

Design of a Composite Chassis Car

Ana Rita Pinto Teixeira

Dissertação do MIEM

Orientador na FEUP: Prof. António Ferreira

Supervisor na FEUP: Prof. António Torres Marques



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho 2014

Resumo

Este documento pretende identificar os pontos mais relevantes quando se projeta um componente estrutural, como é o caso de um chassi, correndo a materiais compósitos. Para o demonstrar, será usado um modelo do *Citroën 2cv*.

Inicia-se o projeto pelo estudo do valor único do componente, onde é descrita a função da estrutura, aquilo que está já desenvolvido no mercado e os parâmetros a considerar quando se pretende desenvolver o seu *design*.

Para projetar com materiais compósitos é necessário ter conhecimento dos materiais e da sua composição (matriz e reforço), dos processos de produção existentes, quais as consequências da maquinaria neste tipo de materiais, bem como os pontos que poderão ser críticos num componente estrutural e originar, mais tarde, uma possível falha ou rotura. E porque o futuro é feito de materiais recicláveis, há uma abordagem a este tema, cada vez mais atual e de maior importância, onde se fala das fibras naturais.

Perceber-se-á que existe dependência entre a tensão máxima obtida na estrutura, a espessura das camadas e o número de camadas que origina o sistema compósito.

São ainda comparados dois modelos e três tipos de processo e formação do chassi, o modelo original, o modelo 100% construído em materiais compósitos e a junção dos dois, ou seja, uma solução híbrida.

É descrito como este projeto poderá ser implementado e produzido em ambiente industrial.

No fim do documento é possível perceber alguns procedimentos das simulações feitas através da apresentação de um tutorial de procedimento para o *software abaqus*.

Design of a Composite Chassis Car

Abstract

This document has the aim to show the most important steps during the structural component engineering, like a car frame, using composite. For this study, the frame used was from a Citroen 2cv car.

This study starts with state of the art showing the value of the unique component, where is described the main function, what is already developed in the market and the parameters to take in consideration during the design of a frame.

To be possible engineering with composites is necessary to know very well the materials used and his characteristics (matrix and reinforcement), existences of productions processes, the consequences when milling this type of material and other critical parameters which could cause a possible failure or fracture in such structural component. Since the recyclable materials are very actual and promissing subject in a close future, this study will approach this subject describing the natural fibers.

During the current study it will be shown the dependence among the maximum tension in the structure and the number of layers which makes the composite system. Also it is described and compared two models and three process and frame building types: the original model; the model with 100% composite materials; the joint of the two above processes, which is a hybrid solution;

In the chapter 7 is described how this frame could be implemented and put in production in an industrial environment.

In appendix is a tutorial using the software abaqus explaining the procedures and steps for the simulations done.

Agradecimentos

Aos meus orientador e supervisor, pelo tempo disponibilizado e por todo o conhecimento transmitido. Pelo acompanhamento durante esta fase final.

Ao engenheiro Paulo Neves no IDMEC, pela ajuda na resolução de problemas relativos ao abaqus, na retificação de geometria e criação de malhas nos modelos.

À engenheira. Célia, no INEGI, pelo conhecimento transmitida quanto à produção e desenvolvimento de moldes e manufatura de formas complexas.

Aos meus pais que tornaram tudo isto possível. Que me deram todo o suporte e me apoiaram em todos os momentos.

Aos meus amigos que sempre me acompanharam e me ajudaram em tudo como podiam.

*A todos,
Muito obrigado!*

Lista de Abreviaturas

GPa – Giga Pascal

MPa – Mega Pascal

RTM – *Resin Transfer Moulding*

ρ - Peso específico

ϵ_r – Deformação na rotura

σ_{tf} – Resistência à tração (MPa)

σ_{uc1} – Tensão de rotura longitudinal à compressão (MPa)

σ_{uc2} – Tensão de rotura transversal à compressão (MPa)

σ_{uf1} – Tensão de rotura longitudinal à tração (MPa)

σ_{uf2} – Tensão de rotura transversal à tração (MPa)

τ_{12} – Tensão de corte no plano (MPa)

ν_{xy} – Coeficiente de *Poisson*

E_1 – Módulo de elasticidade longitudinal (MPa)

E_2 – Módulos de elasticidade transversal (MPa)

G_{12} ou G_{23} – Módulos de corte no plano e fora do plano (MPa)

mm^2 – milímetros quadrados

MEF – Método de Elementos Finitos

IDMEC – Instituto de Engenharia Mecânica

INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

cc – Centímetros cúbicos

cv – Cavalos

rpm – Rotações por minuto

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1.	Organização.....	2
2	Revisão teórica.....	3
2.1.	Estado da arte.....	3
2.2.	<i>Citröen 2cv</i>	6
2.3.	Objetivos	8
3	Materiais Compósitos.....	11
3.1.	Matriz	11
3.2.	Reforço.....	13
3.3.	Processos de Fabrico de Materiais Compósitos	14
3.4.	Maquinagem de Materiais Compósitos	18
3.5.	Constantes de engenharia	19
3.6.	Fadiga em compósitos	20
3.7.	Green Composites	22
3.8.	Reciclagem de materiais Compósitos	24
4	Seleção de Materiais.....	25
4.1.	Caracterização geral dos materiais compósitos	26
4.2.	Fibra de Vidro.....	28
4.3.	Fibra de Carbono	29
4.4.	Fibra de Aramida.....	29
4.5.	Estruturas Sanduiche	32
4.6.	Algumas soluções	33
5	<i>Design</i> do Chassi	35
5.1.	Projetar em materiais compósitos	35
5.2.	Ligações.....	35
5.3.	Curvas em Compósitos.....	39
5.4.	Modelos.....	39
6	Casos de Estudo	43
6.1.	Parâmetros a considerar	44
6.2.	Modelo Estático.....	47
6.3.	Definição do ponto crítico.....	47
7	Projeto de fabrico de moldes	49
7.1.	O chassi.....	49
8	Métodos Numéricos	51
8.1.	Solução analítica.....	51
8.2.	Solução numérica	53
8.3.	Malha	55
8.4.	Condições de Fronteira.....	56
8.5.	Forças aplicadas no modelo original	57
8.6.	Forças aplicadas no modelo compósito	58
8.7.	Propriedades dos materiais utilizados.....	58

9	Resultados.....	65
9.1.	Resultados do segundo modelo	66
9.2.	Resultados do primeiro modelo	70
9.3.	Resultados do modelo híbrido	72
9.4.	Rigidez dos modelos	73
9.5.	Rigidez dos modelos	75
10	Discussão dos resultados.....	79
11	Conclusões e trabalhos futuros	83
12	Referências e Bibliografia.....	85
ANEXO A:	Caraterização dos Materiais Compósitos	89
ANEXO B:	Resultados	93
ANEXO C:	Deslocamentos e tensões.....	99
ANEXO D:	Tutorial	107
ANEXO E:	Desenhos	111

Índice de figuras

Figura 1- Carro Solar e o seu Chassis em materiais compósitos (Kanolan 2011).	4
Figura 2- Porsche RS Spyder (ROWIECKI 2007).....	4
Figura 3- Chassis em materiais compósitos da Ferrari (Ferrari 2012).	4
Figura 4- Renault R24 com Chassis em materiais compósitos (F1Technical 2004).....	5
Figura 5- Representação da estrutura em Carbono do BMW i (BMW 2013).	6
Figura 6- Dimensões do <i>Citröen</i> 2cv (2cv/Dyane 2009).....	7
Figura 7- Chassi do <i>Citröen</i> 2cv adaptado de (2cv/Dyane 2009).....	8
Figura 8- Constituintes do automóvel produzidos em materiais compósitos.	9
Figura 9- Classificação dos materiais compósitos com base na matriz, adaptado de (Yang et al. 2012).	11
Figura 10- Classificação dos materiais compósitos com base no reforço, adaptado de (Yang et al. 2012).	13
Figura 11- Processo Autoclave, adaptado de (Campbell 2004).	15
Figura 12- Processo de infusão de resina assistida por vácuo (empresa <i>Airtech</i>).	16
Figura 13- Processo RTM, adaptado de (Campbell 2004).	17
Figura 14- Processo SMC, baseado em (Campbell 2004).....	18
Figura 15- Classificação das fibras naturais (Esteves 2009).	23
Figura 16- Principais constituintes de um automóvel, adaptado de (Yang et al. 2012).	25
Figura 17- Módulo de <i>Young</i> dos materiais compósitos (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007).	26
Figura 18- Tipo de ligações, retirado de (Marques 2013).	36
Figura 19- Modos de rotura e suas causas, adaptado de (Marques 2013).	36
Figura 20- Definição dos parâmetros "e", "b" e "w", adaptado de (Marques 2013).	37
Figura 21- Modos de ligações coladas mais frequentes, retirado de (Marques 2013).	38
Figura 22- Modos de rotura de ligações coladas, retirado de (Marques 2013).	38
Figura 23- Vista superior do chassi original (<i>Solidworks</i>).	39
Figura 24- Modelo utilizado para a aplicação dos materiais compósitos (<i>abaqus</i>).....	40
Figura 25- Modelo híbrido (<i>abaqus</i>).	41
Figura 26- Durabilidade de componentes estruturais, adaptado de (Hägele e Sonsino 2012).	43
Figura 27- Efeito da torção do chassi (Wass 2013).	44
Figura 28- Parâmetros a considerar para o cálculo da rigidez do chassi (Wass 2013).....	45
Figura 29- Efeito de flexão do chassi (Wass 2013).	46

Figura 30- Representação da flexão lateral no chassi (Wass 2013).....	46
Figura 31- Representação estática do modelo original	51
Figura 32- Representação dos momentos fletores do modelo original	52
Figura 33- Representação estática do segundo modelo do chassi	52
Figura 34- Representação dos momentos fletores no segundo modelo	52
Figura 35- Metodologia de análise por elementos finitos, adaptado de (Nor et al. 2012).	54
Figura 36- Malha triangular utilizada no modelo original (<i>abaqus</i>).....	56
Figura 37- Condições de fronteira aplicadas (<i>abaqus</i>).	56
Figura 38- Carga distribuída aplicada no modelo original (<i>abaqus</i>).	57
Figura 39- Área superficial total no modelo original (<i>abaqus</i>).	57
Figura 40- Forças aplicadas no segundo modelo para materiais compósitos (<i>abaqus</i>).	58
Figura 41- Deformação do chassi em aço (<i>abaqus</i>).....	65
Figura 42- Ponto crítico do chassi em aço (<i>abaqus</i>).....	66
Figura 43- Deformação do chassi (<i>abaqus</i>).	69
Figura 44- Exemplo de deformação do 1º modelo (<i>abaqus</i>).	70
Figura 45- Exemplo de deformação da estrutura híbrida (<i>abaqus</i>).	73
Figura 46- Forças aplicadas para o cálculo da rigidez (<i>abaqus</i>).....	73
Figura 47- Critério de <i>Hashin</i> , fibra de vidro epóxico à tração (<i>abaqus</i>).....	76
Figura 48- Critério de <i>Hashin</i> , fibra de vidro epóxico à compressão (<i>abaqus</i>).....	76
Figura 49- Critério de <i>Hashin</i> , matriz da fibra de vidro epóxico à compressão (<i>abaqus</i>).....	77
Figura 50- Critério de <i>Hashin</i> , matriz da fibra de vidro epóxico à tração (<i>abaqus</i>).....	77
Figura 51- Resistência à tração dos materiais compósitos (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007).	89
Figura 52- Eficiência Mecânica dos materiais compósitos (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007).	90
Figura 53- Resistência à fratura dos materiais compósitos (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007).	91
Figura 54- Indicação do módulo " <i>Property</i> "	107
Figura 55- Como introduzir as propriedades dos materiais.	107
Figura 56- Tipo de secção que se pretende criar.....	108
Figura 57- Módulo " <i>Assembly</i> "	108
Figura 58- Definir forças e condições de fronteira	109
Figura 59- Definir a simulação	109
Figura 60- Visualizar resultados	110

Índice de tabelas

Tabela 1- Caraterização de algumas matrizes termoplásticas (Moura, Morais, e Magalhães 2011).....	12
Tabela 2- Caraterização de algumas matrizes termoendurecíveis (Moura, Morais, e Magalhães 2011).....	13
Tabela 3- Propriedades de alguns reforços utilizados (Moura, Morais, e Magalhães 2011). ..	14
Tabela 4- Propriedade da Fibra de Vidro (Cramer, Taggart, e Inc 2002; EduPack 2013).	28
Tabela 5- Propriedades das Fibras de Carbono (Cramer, Taggart, e Inc 2002; Marques 2013).	29
Tabela 6- Propriedades das principais fibras, adaptado de (Marques 2013; Cramer, Taggart, e Inc 2002).....	31
Tabela 7 - Falhas das estruturas sanduiche, adaptado de (Almeida 2013; Broughton, Crocker, e Gower 2002).	32
Tabela 8- Propriedades do Aço.	59
Tabela 9- Propriedades do alumínio.	59
Tabela 10- Propriedades do carbono (T800H) epóxico (3900-2) e carbono (IM7) epóxico (977-2) (Moura, Morais, e Magalhães 2011).	60
Tabela 11- Propriedades do carbono (T300) epóxico (934) e carbono (AS4) epóxico (3501-6) (Moura, Morais, e Magalhães 2011).	61
Tabela 12- Propriedades do carbono (AS4) PEEK (APC2) e fibra de vidro epóxico (Moura, Morais, e Magalhães 2011).	61
Tabela 13- Propriedades da fibra de KEVLAR® epóxico e fibra de carbono epóxico (Gay, Hoa, e Tsai 2002).	62
Tabela 14- Propriedades da fibra de vidro E e <i>Strucell</i> P80.....	62
Tabela 15- Tensões máximas, obtidas com as camadas [2,2,2].	66
Tabela 16- Tensões obtidas para as camadas [3,3].....	67
Tabela 17- Tensões obtidos para as camadas [2,4,2].	67
Tabela 18- Tensões obtidos para as camadas [4,4].	68
Tabela 19- Tensões obtidas para as camadas [5,5].....	68
Tabela 20- Tensões no ponto crítico de C (T800H) epóxico e C (T300) epóxico (934)..	69
Tabela 21- Tensões no ponto crítico de fibra de vidro epóxico e fibra de KEVLAR® epóxico	69
Tabela 22- Tensões no ponto crítico de fibra de carbono epóxico.....	70
Tabela 23- Deslocamentos máximos para diferentes espessuras de aço e alumínio.	70
Tabela 24- Tensões máximas para o primeiro modelo para C (T800H) epóxico.	71
Tabela 25- Tensões no ponto crítico de C (T800H) epóxico.	71

Tabela 26- Tensões no ponto crítico de C (T300) epóxico e C (AS4) PEEK, primeiro modelo.	71
Tabela 27- Tensões no ponto crítico de fibra de vidro epóxico e fibra de KEVLAR® epóxico, primeiro modelo.	71
Tabela 28- Tensões máximas para o primeiro modelo para fibra de carbono epóxico.	72
Tabela 29- Tensões no ponto crítico de carbono epóxico, primeiro modelo.	72
Tabela 30- Tensões máximas para o primeiro modelo para a estrutura sanduiche.	72
Tabela 31- Tensões máximas para o modelo híbrido com C (AS4) PEEK	72
Tabela 32- Tensões no ponto crítico de C (AS4) PEEK, modelo híbrido	73
Tabela 33- Valores utilizados.	74
Tabela 34- Rigidez para o primeiro e segundo modelo.	74
Tabela 35- Valor de α para o segundo modelo.	75
Tabela 36- Valor de α para o primeiro modelo.	75
Tabela 37- Resultados das primeiras simulações, espessuras [2,4,2].	93
Tabela 38- Resultados das primeiras simulações, espessuras [4,4].	94
Tabela 39- Resultados das primeiras simulações, espessuras [2,2,2].	95
Tabela 40- Resultados das primeiras simulações, espessuras [3,3].	96
Tabela 41- Resultados das primeiras simulações, espessuras [5,5].	97
Tabela 42- Deslocamentos máximos no primeiro modelo.	99
Tabela 43- Tensão máxima C (T800H) epóxico [0,90], 2º modelo.	99
Tabela 44- Tensões no ponto crítico de C (T800H) [0,90] epóxico, 2º modelo.	99
Tabela 45- Tensão máxima C (T300) epóxico [0,90], 2º modelo.	100
Tabela 46- Tensões no ponto crítico de C (T300) [0,90] Epóxico, 2º modelo.	100
Tabela 47- Tensão máxima C (T300) epóxico [90,0], 2º modelo.	100
Tabela 48- Tensões no ponto crítico de C (T300) epóxico [90,0], 2º modelo.	100
Tabela 49- Tensão máxima C (AS4) PEEK [0,90], 2º modelo.	100
Tabela 50- Tensões no ponto crítico de C (AS4) PEEK [0,90], 2º modelo.	100
Tabela 51- Tensão máxima C (AS4) PEEK [90,0], 2º modelo.	101
Tabela 52- Tensões no ponto crítico de C (AS4) PEEK (APC2) [90,0], 2º modelo.	101
Tabela 53- Tensão máxima fibra de vidro epóxico [0,90], 2º modelo.	101
Tabela 54- Tensões no ponto crítico de fibra de vidro epóxico [0,90], 2º modelo.	101
Tabela 55- Tensão máxima fibra de vidro epóxico [90,0], 2º modelo.	101
Tabela 56- Tensões no ponto crítico de fibra de vidro epóxico [90,0], 2º modelo.	101
Tabela 57- Tensão máxima fibra de KEVLAR® epóxico [0,90], 2º modelo.	102
Tabela 58- Tensões no ponto crítico de fibra de KEVLAR® epóxico [0,90], 2º modelo.	102

Tabela 59- Tensão máxima fibra de KEVLAR® epóxico [90,0], 2º modelo	102
Tabela 60- Tensões no ponto crítico de fibra de KEVLAR® epóxico [90,0], 2º modelo.	102
Tabela 61- Tensão máxima fibra de carbono epóxico [0,90], 2º modelo.....	102
Tabela 62- Tensões no ponto crítico de fibra de carbono epóxico [0,00], 2º modelo.....	102
Tabela 63- Tensão máxima fibra de carbono epóxico [90,0], 2º modelo.....	103
Tabela 64- Tensões no ponto crítico de fibra de carbono epóxico [90,0], 2º modelo.....	103
Tabela 65- Resultados obtidos para C (T800H) epóxico [0,90], modelo híbrido.	103
Tabela 66- Tensões no ponto crítico de C (T800H) epóxico [0,90], modelo híbrido.	103
Tabela 67- Resultados obtidos para C (T800H) epóxico [0,90], modelo híbrido.	103
Tabela 68- Tensões no ponto crítico de C (T800H) epóxico [0,90], modelo híbrido.	104
Tabela 69- Resultados obtidos para C (T800H) epóxico [90,0], modelo híbrido.	104
Tabela 70- Tensões no ponto crítico de C (T800H) epóxico [90,0], modelo híbrido.	104
Tabela 71- Resultados obtidos para C (T300) epóxico [90,0], modelo híbrido.	104
Tabela 72- Tensões no ponto crítico de C (T300) epóxico [90,0], modelo híbrido.....	104
Tabela 73- Resultados obtidos para fibra de KEVLAR® epóxico [90,0], modelo híbrido. ..	105
Tabela 74- Tensões no ponto crítico de fibra de KEVLAR® epóxico [90,0], modelo híbrido.	105
Tabela 75- Resultados obtidos para fibra de vidro epóxico [90,0], modelo híbrido.....	105
Tabela 76- Tensões no ponto crítico de fibra de vidro epóxico [90,0], modelo híbrido.....	105
Tabela 77- Resultados obtidos para fibra de carbono epóxico [90,0], modelo híbrido.	105
Tabela 78- Tensões no ponto crítico de fibra de carbono epóxico [90,0], modelo híbrido. ..	106

1 Introdução

Na indústria automóvel, a estrutura mais exigente dos veículos é o chassi, componente que é considerado o esqueleto de todo o carro, onde estão os pontos de montagem de outros componentes que fornecem a resistência estrutural.

Sendo esta uma indústria em constante expansão e renovação, na procura incessante por menores consumos, menores massas, maiores rendimentos e resistências e menor poluição, a utilização em grande escala de materiais compósitos nas estruturas contribui para uma redução significativa de peso, permitindo, deste modo, um aumento da lotação dos aparelhos e uma maior rentabilidade que as diferentes empresas não podem descurar num mercado de forte concorrência (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Esta dissertação pretende demonstrar o *design* de um chassi, utilizando materiais compósitos na sua construção.

O modelo do chassi a projetar foi escolhido pelo apreço especial do clássico em questão, por se tratar de um veículo emblemático que apresenta a mecânica transversal a todos os veículos, porque é muito utilizado por amantes de clássicos e seria possível ter um chassi do mesmo à disposição. Assim sendo, o chassi em estudo é o do *Citröen 2cv*.

Pretende-se com esta dissertação, conseguir estudar, caraterizar e simular um chassi que torne possível a utilização de materiais compósitos na sua constituição. Não foi possível construir o modelo real do chassi, já que isso requer fundos e tempo que esta dissertação não permite. Este trabalho visa contribuir, tanto na área académica como industrial, relacionando o *design*, a seleção de materiais e a simulação computacional através de *softwares* de modelação e análise estrutural, recorrendo ao método dos elementos finitos.

Para a realização de todo este trabalho foi necessário recorrer a diversos *softwares*: i) *Ces EduPack*, para definir algumas propriedades dos materiais; ii) *ANSA*, na correção do modelo e da malha para ser possível a análise através de elementos finitos; iii) *Abaqus*, para todas as simulações estáticas efetuadas e iv) *MS Office*, quer *Excel*, quer *Word* para a organização dos dados das simulações, bem como para a escrita deste documento, respetivamente.

1.1. Organização

A estrutura do presente relatório é feita por capítulos, sendo este primeiro uma pequena introdução ao tema, bem como a indicação dos conteúdos que serão abordados.

No segundo capítulo é feita a revisão teórica, onde é apresentado o estado da arte com exemplos do que está desenvolvido na área automóvel e em particular em chassis de materiais compósitos. Aqui poderá perceber-se a crescente utilização destes materiais nos mais diversificados componentes.

No capítulo três são introduzidos os materiais compósitos, estes são caracterizados e definidos, no que concerne à matriz e ao reforço, bem como ao seu processo de fabrico. São ainda abordados temas, como a maquinaria nestes materiais, a sua evolução em utilizações amigas do ambiente, recorrendo às fibras naturais, e por fim, a sua reciclagem que é um tema muito importante hoje em dia.

É no capítulo número quatro que começa o processo de *design* do chassi pela seleção de materiais. Neste caso específico, direcionado apenas para materiais compósitos porque são o alvo do estudo desta dissertação. Pretende-se assim dar a conhecer as excelentes propriedades destes materiais de forma a ser possível a sua utilização em componentes estruturais.

Para lhe dar continuidade, no capítulo 5 explica-se o que é necessário ter em consideração quanto se deseja projetar em materiais compósitos. Finaliza-se este capítulo mostrando os modelos em que se vai basear este estudo e justificando todas as escolhas feitas. Seguidamente, são retratados no capítulo 6, os casos de estudo, que vão complementar o processo de *design*, tornando este um processo mais sólido.

Depois disto, o processo de *design* ainda não terminou, é necessário pensar em como dar origem ao componente que se projetou, daí a introdução do capítulo 7 sobre fabrico e moldes.

Para dar continuidade depois de escolhidos os materiais candidatos, é necessário perceber analiticamente, bem como recorrendo a programas expeditos de cálculos com elementos finitos, se estes serão capazes de suportar todas as cargas a que a estrutura está sujeita. Assim surgem os assuntos abordados nos capítulos 8 e 9. O primeiro com uma abordagem mais teórica sobre os métodos numéricos que serão utilizados. E o segundo focado nas características e procedimentos que é necessário seguir para conseguir simular no *software abaqus*.

Desta forma, apresentam-se os resultados das simulações no capítulo 10, seguidos da discussão dos resultados no capítulo 11. São apresentadas as conclusões do projeto no capítulo 12 e como um processo de *design* é iterativo, bem como, são deixadas algumas sugestões de maneira a dar continuidade e ser possível melhorar o resultado final. Ainda são apresentadas as referências bibliográficas no capítulo 13 e seguem-se a estas os anexos.

No ramo automóvel, os materiais compósitos estão a ser cada vez mais utilizados e são alvo de estudo e desenvolvimento, sendo que, haveria muitos assuntos a abordar, mas sendo o foco do tema, apenas o chassi, a tese foi direcionada apenas para os materiais compósitos utilizados no chassi.

2 Revisão teórica

Este segundo capítulo tem como objetivo apresentar o que tem sido desenvolvido no âmbito dos chassis em materiais compósitos. Serão apresentados diversos exemplos, bem como a sua descrição. Depois disso, são dadas informações sobre o chassi utilizado neste estudo, bem como do carro a que pertence.

2.1. Estado da arte

Fórmula 1

O primeiro retrato do uso de compósitos na construção de um carro de corrida data do final de 1920 e início de 1930 sob a forma de madeira e aço utilizado no chassi. O primeiro chassis foi construído no início de 1960 em carros *Cooper*. Embora o carro nunca tenha realmente ido à pista, viria a ser a base de *design* da Fórmula 1 para chassis durante duas décadas. Em 1983, as duas metades da estrutura foram feitas a partir de tecido pré-impregnado¹ e juntou-se na linha central tecido. O chassi da ATS BMW nunca foi o mais cotado, mas é geralmente considerado um dos chassis mais fortes e que mais dura no circuito. A evolução na conceção aerodinâmica, análise estrutural e técnicas de laminação têm garantido o desenvolvimento contínuo do chassi e outras peças. Os chassis MP4-6 utilizados pela *McLaren* em 1991 apresentavam cerca de 75% do seu peso em materiais compósitos, à base de fibra de carbono. Atualmente conseguem atingir percentagens ainda mais elevadas, o que diz bem das potencialidades reconhecidas a estes materiais. Já em 2008, Savage descreveu que os materiais compósitos de fibra de carbono representavam quase 85% do volume de um carro de Fórmula 1 contemporâneo enquanto representariam menos de 25% da sua massa (Savage 2008).

Carro solar

O chassi é uma estrutura em sanduiche, nas camadas exteriores são aplicadas fibras de carbono, finas e fortes, enquanto o núcleo é leve. A função do núcleo é de manter as camadas exteriores de carbono separadas para manter a rigidez da estrutura. Os painéis foram colocados pelos membros da equipa, que segundo (Kanolan 2011) personaliza cada painel com fibra de carbono unidirecional, que é muito forte numa única direção. Estes painéis são então colados com adesivo estrutural e selados em torno das costuras com mais carbono. A Figura 1 retrata este modelo.

¹ O Pré-impregnado consiste na combinação de uma fita ou tecido de fibra, impregnada com resina polimérica. Esta estrutura compósita é fabricada por empilhamento de camadas sucessivas e a cura é feita sob temperatura e pressão.



Figura 1- Carro Solar e o seu Chassis em materiais compósitos (Kanolan 2011).

Porsche RS Spyder

O protótipo de 2007 do carro desportivo (representado na Figura 2) é baseado num chassi de fibra de carbono com suspensão de forquilha dupla para as rodas dianteiras, fixadas à estrutura ultra rígida, e ao mesmo tempo leve, do chassi. No primeiro ano de corridas, o *Porsche RS Spyder* conseguiu a dobradinha na pista Mis-Ohio (ROWIECKI 2007).



Figura 2- Porsche RS Spyder (ROWIECKI 2007).

Ferrari F70



Figura 3- Chassis em materiais compósitos da Ferrari (Ferrari 2012).

A *Ferrari* lançou no *Paris Autoshow* de 2012 o seu chassi em materiais compósitos (Figura 3). Optou por usar processos de fabrico com fibras de carbono, como é o caso RTM (moldação por transferência de resina). Este chassi usa quatro tipos diferentes de fibra de carbono, laminada à mão e é curado em autoclaves (Ferrari 2012).

Os componentes de fibra de carbono no chassi incluem:

- A primeira camada em carbono T800;
- A parte inferior da carroçaria em compósito de fibras de alta resistência de carbono chamados M46J;
- A porta e outras partes críticas são formadas usando fibra de carbono T1000 (este é o mesmo material que utilizam na dianteira dos carros de corrida de Fórmula 1).
- Finalmente, o forro é feito em fibras de carbono e uma camada de KEVLAR® para evitar danos causados por detritos na estrada (ImagineLifestyles.Com 2013).

O chassis em geral é 20% mais leve (Ferrari 2012).

Renault R24

O chassis do Renault R24 (veículo da Figura 4) é um modelo de 2004, híbrido. Isto é, moldado em fibra de carbono com favo de mel em alumínio. Foi projetado para a máxima resistência e rigidez com peso mínimo (F1Technical 2004).

Este chassis foi moldado em autoclave² (Moura, Moraes, e Magalhães 2011).



Figura 4- Renault R24 com Chassis em materiais compósitos (F1Technical 2004).

BMW i

Este modelo de 2013 tem a primeira célula de passageiros produzida em série utilizando fibra de carbono. A BMW i revolucionou a indústria automóvel. É a primeira a ser concebida exclusivamente para automóveis elétricos. Existem nesta modalidade o *Coupé* BMW i3 e o desportivo BMW i8 (representado na Figura 5). Estes veículos reduzem as emissões de CO₂ e utilizam eletricidade proveniente de fontes renováveis (BMW 2013).

² A moldação em autoclave é abordada neste documento na secção 3.3.1

Este carro foi produzido em materiais compósitos porque foi necessário compensar o aumento do peso das baterias usadas, com a diminuição do peso do chassi.



Figura 5- Representação da estrutura em Carbono do BMW i (BMW 2013).

2.2. Citroën 2cv

É o mais mítico carro da marca *Citroën*. Este modelo nasce já sobre a direção da *Michelin* e é o resultado da necessidade de produzir um automóvel de uma gama ainda mais baixa e acessível a um maior número de pessoas. Este modelo tinha cerca de 200 veículos prontos em 1939 que foram destruídos logo após a declaração de guerra. Apenas 4 exemplares sobreviveram pois foram secretamente escondidos.

Quando é apresentado em 1948, é ligeiramente diferente mas mantém o mesmo espírito. O motor passou de 375 cm³ para 602 cm³. No total, em 48 anos, foram produzidos 5 114 940 veículos. A Figura 6 mostra as dimensões do veículo.

O modelo era utilizado pelo pai da personagem de histórias de banda desenhada argentina “Mafalda” como carro familiar comprado a duras prestações. O 2cv teve também um lugar de destaque nas famosas “Aventuras de Tintim” de *Hergé*, no livro “O caso Girassol” ao ser conduzido pelos detetives *Dupond* e *Dupond*. O mais carismático e acarinhado modelo de todos os tempos fez ainda parte de uma edição especial dos Chocolates da *Carte d’Or* que juntava as personagens das “Aventuras de Tintim” a vários modelos da *Citroën*. Fez parte também de um dos filmes do 007, como o carro principal usado pelo espião (2cv/Dyane 2009).

2.2.1 – Características

Motor: 602 cc, 2 cilindros horizontalmente opostos, refrigerado a ar, 3 cv de potência fiscal, 29 cv @ 5 750 rpm (602,14 rad/s).

Transmissão: Tração dianteira via 4 velocidades.

Freios: Discos à frente, tambores traseiros, freios dianteiros montados interiormente, a operação hidráulica. O freio de estacionamento atua nas rodas da frente da suspensão,

totalmente independente, interligado a dianteira e a traseira com molas longitudinais e amortecedores hidráulicos.

Direção: Pinhão e cremalheira.

Pneus: 125 x 380 *Michelin X*.

Dimensões: Comprimento 3 820 mm, largura de 1 480 mm, altura de 1 600 mm, distância entre eixos de 2 400 mm, Via dianteira e traseira 1 260 mm;

Peso 495 kg.

A velocidade máxima: 31,95 m/s (115km/h).

Construído: 1979 – 1990

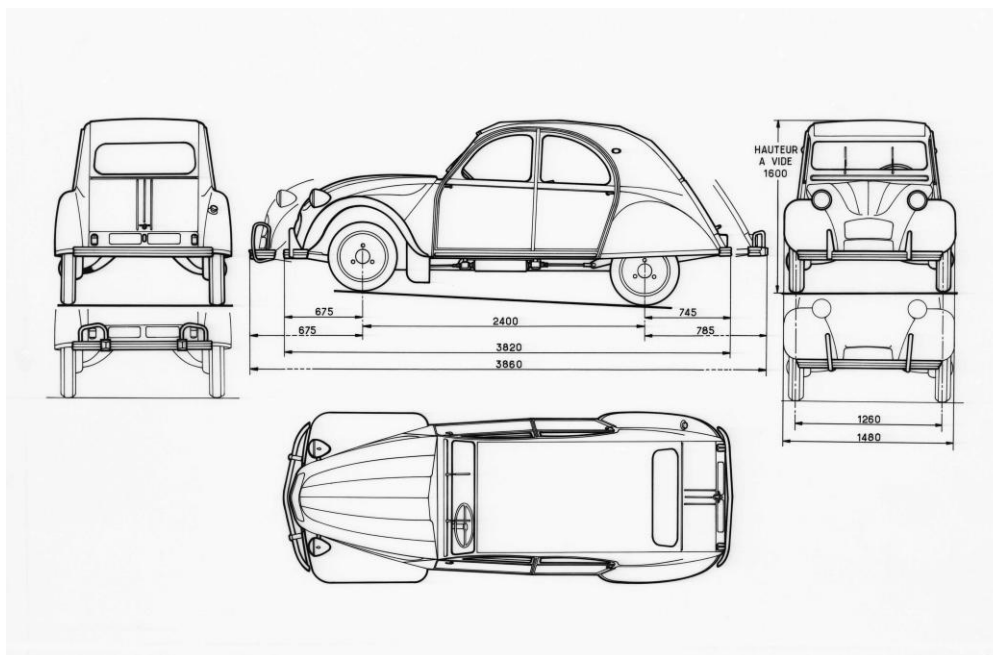


Figura 6- Dimensões do *Citröen 2cv* (2cv/Dyane 2009).

2.2.2 – Chassi

O objetivo do chassi é suportar todos os componentes e ocupantes, este deve absorver todas as cargas a que está sujeito sem que sofra deslocamentos indevidos. Trata-se de uma estrutura completa (Costin 1967).

O sistema de suspensão inclui molas, amortecedores, e outros componentes que permitem que o veículo circule sobre terreno irregular sem que isso se faça sentir nos passageiros ou na carga a transportar. O mecanismo de direção é parte integrante do chassi, uma vez que proporciona ao operador um meio de controlar a direção da viagem. Trabalhando em conjunto com a suspensão, os pneus absorvem a maior parte dos choques provocados pelas irregularidades da estrada. O corpo do veículo “acolhe” os componentes mecânicos e o compartimento dos passageiros.

Este chassi classifica-se como sendo do tipo plataforma, apresenta o piso completamente coberto em aço estampado e reforçado com nervuras e longarinas longitudinais (como se pode observar na Figura 7), garantido a necessária resistência longitudinal à torção e à flexão.

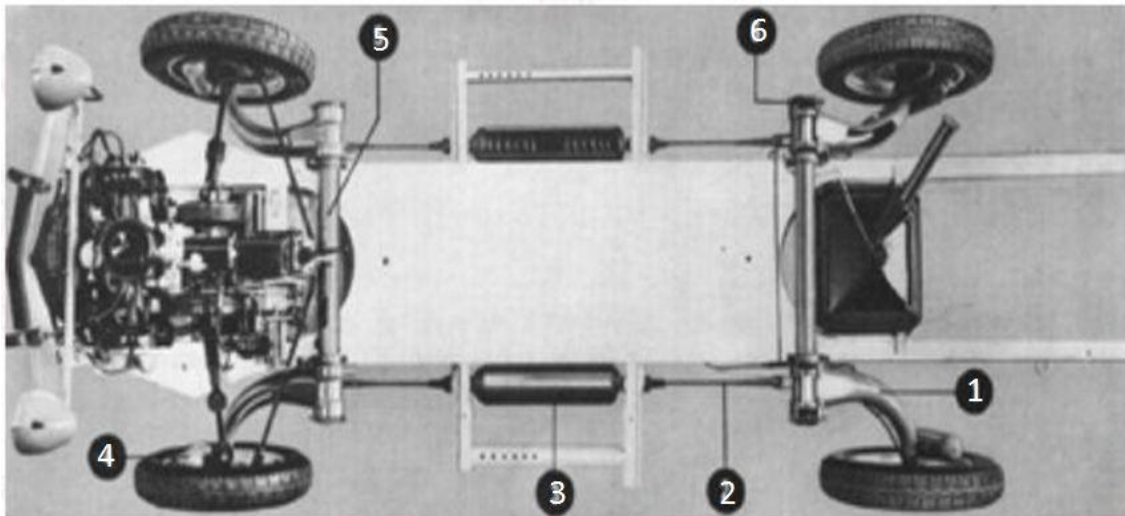


Figura 7- Chassi do Citroën 2cv adaptado de (2cv/Dyane 2009).

O chassi compreende duas longarinas longitudinais onde estão associados:

- 1) Braços de suspensão;
- 2) Tirantes;
- 3) Cilindros de suspensão;
- 4) Amortecedores;
- 5) Travessa transversal (não uma barra estabilizadora);
- 6) Amortecedores (Marsh 1996).

As longarinas ou trilhos são a parte mais pesada do quadro. Os membros laterais são formados para acomodar o corpo e suportar o peso. Permitem um raio mais curto de viragem das rodas, e alargam a parte principal onde o corpo é fixo à plataforma.

As travessas são fixas às longarinas para evitar a torção do quadro. O número, tamanho e disposição destes elementos transversais dependem do tipo de veículo mas, regra geral, se aplicadas na zona frontal é para suportar o radiador e na dianteira o motor. Na traseira do veículo servem de suporte aos reservatórios de combustível, aos passageiros, ao porta-malas e também, para as ligações a reboque que o carro poderá estar dotado.

As placas de reforço são peças angulares de metal que servem como reforço adicional para os quadros, de maneira a tornar o quadro um elemento rígido e forte o suficiente para resistir a cargas dinâmicas, e absorver os choques e vibrações transferidos a partir do quadro.

Tem como principais vantagens: a facilidade de montagem e desmontagem da estrutura do corpo; a versatilidade; é um chassi forte, com um *design* robusto e simples, que permite um processo de fabrico relativamente barato e simples (Seal Web Design 2009).

2.3. Objetivos

Sendo o chassi o quadro central de um veículo que tem de suportar todos os seus componentes e apoiar todas as cargas (Mat e Ghani 2012). Pretende-se que seja possível chegar a uma solução de uma estrutura em materiais compósitos obtendo as seguintes características:

- 1) Suportar o número de ocupantes normais do veículo tradicional, ou seja 5 pessoas;
- 2) Se não for possível diminuir o peso do veículo, já que o modelo escolhido é bastante leve, manter o peso original, mas nunca aumentá-lo;
- 3) Capacidade de albergar todas as subestruturas que são adjacentes ao chassi tradicionalmente;
- 4) Produção de um novo conceito de estrutura do veículo utilizando materiais compósitos;
- 5) Contribuir para o desenvolvimento no sector automóvel;

Como resumo, já há vários estudos e sistemas desenvolvidos em materiais compósitos na indústria automóvel. A Figura 8 faz referência a componentes de veículos além do chassi onde já são utilizados este tipo de materiais. Nota-se dessa forma, como é cada vez mais abrangente e diversificada a sua utilização.

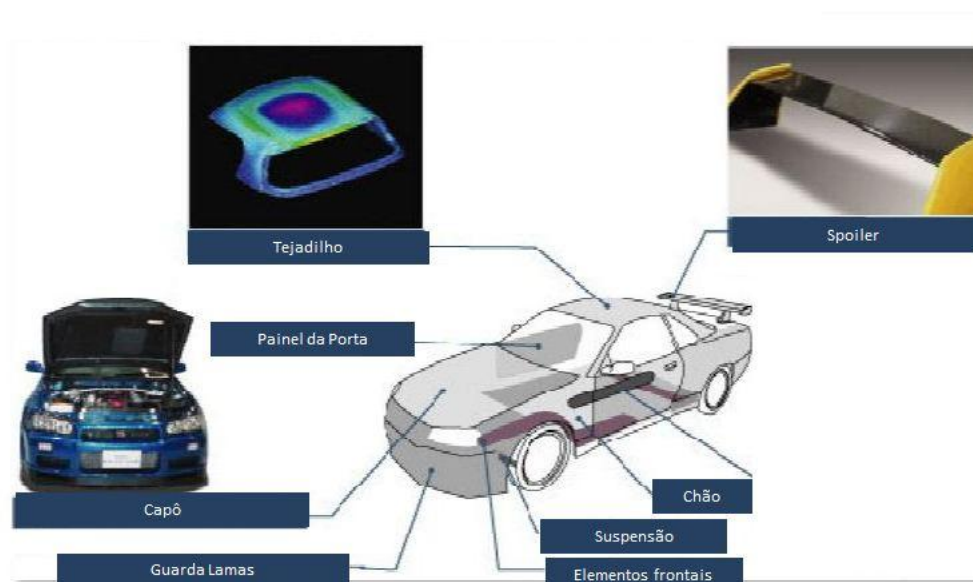


Figura 8- Constituintes do automóvel produzidos em materiais compósitos.

As propriedades específicas dos materiais compósitos permitem aumentar a resistência específica da estrutura, tal facto será abordado no capítulo seguinte, onde é feita a caracterização deste tipo de materiais.

3 Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são definidos como materiais em que dois ou mais componentes são reunidos para produzir um novo material composto por, pelo menos, dois componentes distintos quimicamente (Xenia Materials 2012).

Os materiais compósitos podem classificar-se segundo vários critérios, um dos mais relevantes é o tipo de matriz e o reforço.

3.1. Matriz

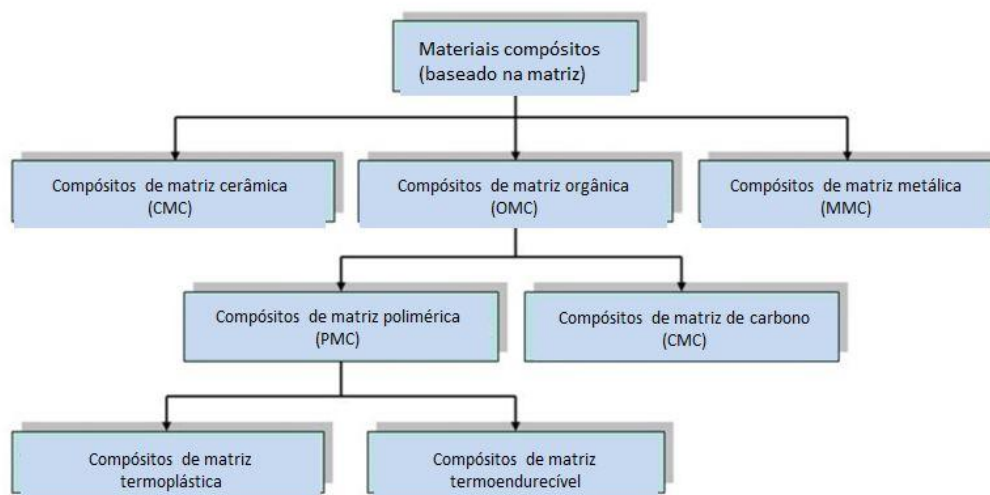


Figura 9- Classificação dos materiais compósitos com base na matriz, adaptado de (Yang et al. 2012).

A matriz faz parte de uma das características mais importantes destes materiais já que lhe são conferidas funções essenciais como: i) dar forma estável ao compósito; ii) assegurar a distribuição eficiente da carga pelas fibras; iii) proteger as superfícies das fibras; iv) transferir as cargas para o reforço; v) acrescentar tenacidade ao compósito, vi) assegurar o posicionamento do reforço, entre outros.

Esta pode ser constituída por diferentes materiais e embora os polímeros sejam mais usado em materiais compósitos, também há matrizes de materiais metálicos, cerâmicos, carbono e cimentosas, por exemplo.

Os materiais compósitos de matriz polimérica podem ser divididos em duas famílias distintas de matrizes: as termoplásticas e as termoendurecíveis. Estima-se que os compósitos de matriz termoplástica representem cerca de 35% do mercado mundial de materiais compósitos. Podem dividir-se os compósitos de matriz termoplástica em três categorias distintas: 1) os compósitos de fibras curtas, produzidos a partir de grânulos contendo fibras de

comprimento inferior a 6,4 milímetros e 2) os compósitos de fibras contínuas, que se destacam por apresentarem propriedades mecânicas superiores.

Para aplicações não estruturais e semi-estruturais, os polímeros que se encontram mais frequentemente como matriz são polipropileno, poliamidas (ou *Nylon*®) e policarbonatos. São facilmente processados por injeção ou por termoconformação e podem ser reciclados, o que constitui um ponto importante nos dias de hoje (Moura, Morais, e Magalhães 2011). Para além dessas ainda existem mais matrizes termoplásticas, as suas características estão na Tabela 1.

Tabela 1- Caracterização de algumas matrizes termoplásticas (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

<i>Compósitos</i>	<i>Temperatura máxima de funcionamento</i>	<i>Caraterísticas</i>
PEEK (poli-éter-éter-acetona)	250 °C	Maior tenacidade e baixa absorção de água. Custo elevado.
Poliimidas termoplásticas	260 °C	Elevada resistência mecânica; rigidez a altas temperaturas, estabilidade dimensional, elevada resistência à fluência e podem ser reproprocessadas.
PPS (Polisulfureto de fenileno)	225°C	Elevada resistência mecânica e excelente resistência química.

As matrizes termoendurecíveis são constituídas por polímeros em que as moléculas formam estruturas tridimensionais bastantes rígidas. Os termoendurecíveis, ao contrário dos termoplásticos não podem ser reproprocessados. Uma vez aquecidos assumem uma forma permanente (Moura, Morais, e Magalhães 2011). Estas caraterísticas permitem obter excelentes propriedades mecânicas, grande resistência a solventes e a elevadas temperaturas. Na Tabela 2 é feita referência a alguns compósitos avançados de matriz termoendurecível. Além desses, pode fazer-se referência a matrizes como os poliésteres insaturados, as resinas de vinilester e as resinas fenólicas.

Como consequência do elevado grau de reticulação que é possível atingir, estes materiais são frequentemente frágeis, o que origina alguma tendência para uma excessiva microfissuração. A melhoria da tenacidade passa por adicionar poliimidas termoplásticas, o que aumenta o tempo de reação e melhora a processabilidade, aspetos favoráveis para o fabrico de peças de geometria mais complexa (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Tabela 2- Caracterização de algumas matrizes termoendurecíveis (Moura, Moraes, e Magalhães 2011).

<i>Compósitos</i>	<i>Caraterísticas</i>
Epóxidos	Elevada resistência mecânica; resistência à abrasão; resistência química; grande estabilidade dimensional; baixa absorção de água. Têm como temperatura de funcionamento entre os 100 e os 220°C.
Poliimidas termoendurecíveis	Elevada estabilidade dimensional a temperaturas elevadas; resistência térmica; boa resistência ao impacto; custo elevado; elevada absorção de água; baixo coeficiente de atrito; difícil transformação. A sua temperatura de funcionamento está retratada para os 260°C.
Bismaleimidas	Baixo peso molecular; elevada resistência térmica; melhor processabilidade; bom comportamento ao desgaste; baixa flamabilidade e baixa emissão de fumos.
Poliéster insaturado	Das mais utilizadas no fabrico de materiais compósitos, devido ao seu baixo custo, facilidade de processamento e boas propriedades mecânicas, elétricas e químicas.
Fenólicas	Com excelente comportamento ao fogo, com baixa emissão de fumos. A principal desvantagem é a libertação de voláteis na cura, que faz com que sejam pouco usadas em compósitos de alto desempenho.

3.2. Reforço

O reforço serve principalmente para suportar as cargas, para fornecer resistência, rigidez, bem como, estabilidade térmica ao compósito. A sua subdivisão está representada na Figura 10.

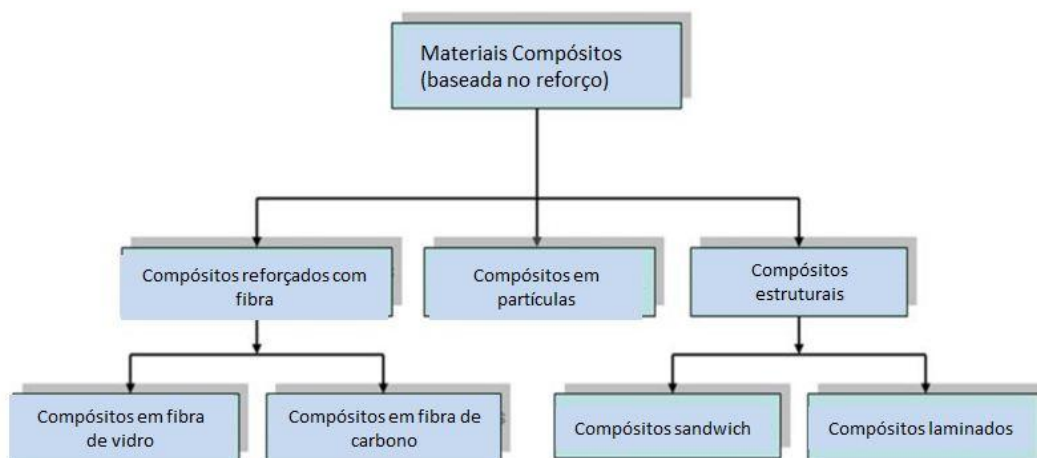


Figura 10- Classificação dos materiais compósitos com base no reforço, adaptado de (Yang et al. 2012).

Existem vários tipos de reforço, os que se apresentam na Tabela 3 são normalmente utilizados em estruturas de maior exigência e em compósitos avançados. Para além destes, podem ser referidos reforços associados a estruturas de menor exigência como por exemplo, as fibras de amianto, sisal, poliamidas e poliésteres.

Tabela 3- Propriedades de alguns reforços utilizados (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

<i>Reforço</i>	<i>Processo de fabrico</i>	<i>Caraterísticas</i>
Fibra de Vidro	Estiramento por vidro fundido.	Resistência ao envelhecimento, devido ao seu teor alcalino.
Fibra de Carbono	Decomposição térmica de celulose, poliacrilonitrilo e alcatrão.	Apresentam as melhores propriedades mecânicas; no sentido longitudinal apresentam um coeficiente de dilatação negativo ou quase nulo.

Para além do reforço e da matriz os compósitos são constituídos por cargas e outros aditivos que se juntam com o propósito de produzir vários efeitos como:

- 1) Diminuição do custo;
- 2) Facilidade de manuseamento;
- 3) Melhoria das caraterísticas de moldação;
- 4) Melhoria das propriedades pós-cura;
- 5) Introdução de motivos decorativos.

As cargas mais comuns são obtidas a partir de depósitos naturais, por exemplo: mica, feldspato, sílica, quartzo, argila ou cálcio; e têm como principal função diminuir o custo do compósito. As suas principais caraterísticas devem ser a boa dispersabilidade, estabilidade de suspensão, baixa densidade, cor clara, baixa percentagem de humidade, baixa absorção de óleo, resistência ao calor e resistência química.

As fibras e a matriz podem ser pré-combinadas, dando origem aos chamados semi-produtos, que são posteriormente processados para a obtenção da peça final (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

3.3. Processos de Fabrico de Materiais Compósitos

Existem diversos processos de fabrico para os materiais compósitos, podem enumerar-se: 1) Moldação por contacto; 2) Moldação por transferência de resina assistida por vácuo; 3) Moldação por compressão; 4) Moldação por injeção de resina; 5) Autoclave; 6) Enrolamento filamentar; 7) Pultrusão; 8) Centrifugação; 9) Moldação em contínuo; 10) Injeção de termoplásticos reforçados.

Os diferentes processos podem ser classificados em dois tipos:

- i) Processos em molde aberto – Apenas uma das superfícies tem bom acabamento, limitação esta que é compensada pela possibilidade de realizar componentes de grandes dimensões e de geometria complexa, pois a pressão exercida é reduzida ou inexistente.

- ii) Processos em molde fechado - apresentam excelente acabamento nas duas superfícies e ótima reprodutibilidade. Tem uma menor emissão de produtos voláteis (nocivos à saúde), nomeadamente o monómero de estireno, presente na maior parte dos processos que envolvem as resinas de poliéster.³

Aqui serão apenas abordados os processos de fabrico, referenciados no estado da arte, bem como os mais comumente aplicado no processo de fabrico de componentes estruturais na indústria automóvel.

3.3.1 – Moldação em autoclave

Consiste em consolidar um componente pré-formado através da aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo. Oferece a vantagem de utilizar elevadas pressões (geralmente 15 bar), resultando numa melhor compactação, maiores percentagens de volume de fibras, e menor teor de vazios e porosidades (Campbell 2004). Neste processo de moldação são frequentemente utilizados os pré-impregnados que são telas de tecidos de fibra impregnados com resina em percentagens maximizadas para a produção de laminados estruturais denominados os compósitos avançados. A moldação em autoclave permite a produção de peças de grandes dimensões e geometrias complexas com elevada qualidade e excelentes propriedades mecânicas, devido à elevada fração volúmica de reforço (mais de 60%). É particularmente adequada para o fabrico de pequenas séries de componentes. As suas principais desvantagens são o forte investimento inicial em moldes e materiais de saco de vácuo, a morosidade na preparação de todo o sistema e o elevado custo energético do equipamento que torna o processo inadequado para a produção em série (Moura, Morais, e Magalhães 2011). A Figura 11 ilustra este processo, para que melhor se perceba.

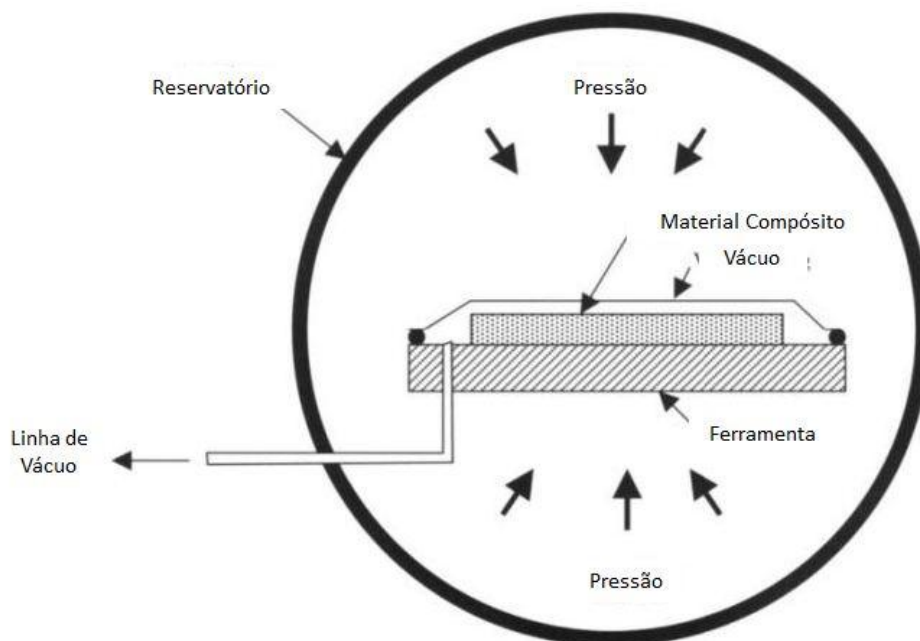


Figura 11- Processo Autoclave, adaptado de (Campbell 2004).

³ Recentes diretivas internacionais impõem limites apertados a estas emissões, facto que tem estimulado o desenvolvimento de novos sistemas de resinas mais ecológicas e a maior utilização de tecnologias de produção por molde fechado.

Neste processo, o pré-impregnado é cortado, empilhado sobre o molde e preparado um saco de vácuo. Todo o conjunto é inserido no reservatório ou saco de vácuo e submetido a um ciclo de pressão e temperatura pré-definido, pressão e vácuo. Como principais vantagens pode dizer-se que na utilização das resinas termoendurecíveis em autoclave, as elevadas temperaturas aceleram o processo de polimerização. Para peças de elevada espessura obtêm-se laminados com menor teor de vazios resultante das forças de vácuo e de pressão; permite obter peças com características mecânicas excelentes e com um bom acabamento superficial na face junto ao molde; em contra partida, é um processo que requer mão-de-obra qualificada no controlo de todo o processo e o ciclo de cura é relativamente demorado, podendo na aeronáutica levar 6 a 8 horas de polimerização. Os componentes estruturais aplicam-se na aeronáutica e a desportos de competição.

3.3.2 – Moldação por transferência de resina a baixa e alta pressão

No processo designado por VARTM (moldação por transferência de resina assistida por vácuo), a fibra é colocada no molde e o conjunto é selado com um saco de vácuo, como se pode ver na Figura 12. A resina é impulsionada para dentro do molde pela ação do vácuo, geralmente a 20 kPa. A estratégia de injeção consiste em posicionar entradas de resina ligadas a um ou mais potes, a resina impregna a fibra e avança até às saídas onde está a ligação com uma bomba de vácuo. Esta tecnologia é muito aplicada em componentes de grandes dimensões como as pás eólicas de 60 metros de comprimento ou barcos de 12 metros.



Figura 12- Processo de infusão de resina assistida por vácuo (empresa Airtech).

Uma variante do processo é a moldação por transferência de resina (RTM), onde o saco de vácuo é substituído por um contra-molde. O reforço é colocado na parte inferior do molde. Fechado o molde, injeta-se resina sob pressão, geralmente a 10^3 kPa, dentro da cavidade de moldação. A resina impregna o reforço e cura, formando o compósito (Figura 13). Permite competir com a moldação em autoclave, com uma redução de custos e percentagens de fibra muito semelhantes.

A característica principal está associada à produção em série de formas estruturais, com formas complexas e redução de poros. Origina peças com excelentes propriedades mecânicas, com um excelente acabamento superficial dos dois lados da peça. Tem como principal desvantagem a necessidade de produção de um segundo molde, o que nem sempre é fácil ou economicamente viável.

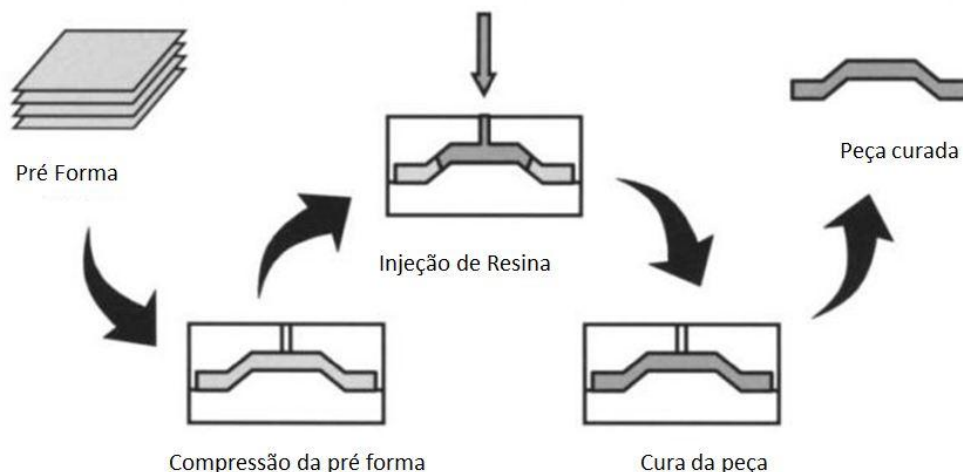


Figura 13- Processo RTM, adaptado de (Campbell 2004).

3.3.3 – Moldação por compressão a quente

É usada com compostos de moldação do tipo SMC (compostos de fibra de vidro curtas com resina poliéster, ou vinilester e cargas). Existem vários tipos, tais como, o HMC que têm elevada resistência mecânica e resistência ao impacto e o BMC (Bulk Molding Compound).

De grande interesse de utilização e aplicação estão os GMT - composto de manta e tecidos de fibra de vidro com matriz termoplástica, porque oferece vantagens em relação aos compósitos termoendurecíveis, já que estes podem ser reprocessados. Podem utilizar qualquer matriz termoplástica, mas 95% das aplicações são à base de Polipropileno por ser mais económico e com boas propriedades. São utilizados fundamentalmente na indústria automóvel. O composto de moldação é colocado no interior de um molde metálico pré-aquecido até 140°C. Por compressão, o composto flui dentro do molde e preenche a cavidade de moldação expulsando o ar acumulado. A peça fica pronta após um curto processo de cura sob o efeito de pressão e temperatura (Moura, Morais, e Magalhães 2011). A Figura 14 permite uma melhor percepção do processo.

A vantagem destes processos consiste na elevada taxa de produção para grandes séries. As desvantagens são o custo dos moldes e a necessidade de utilizar prensas de forças muito elevadas.

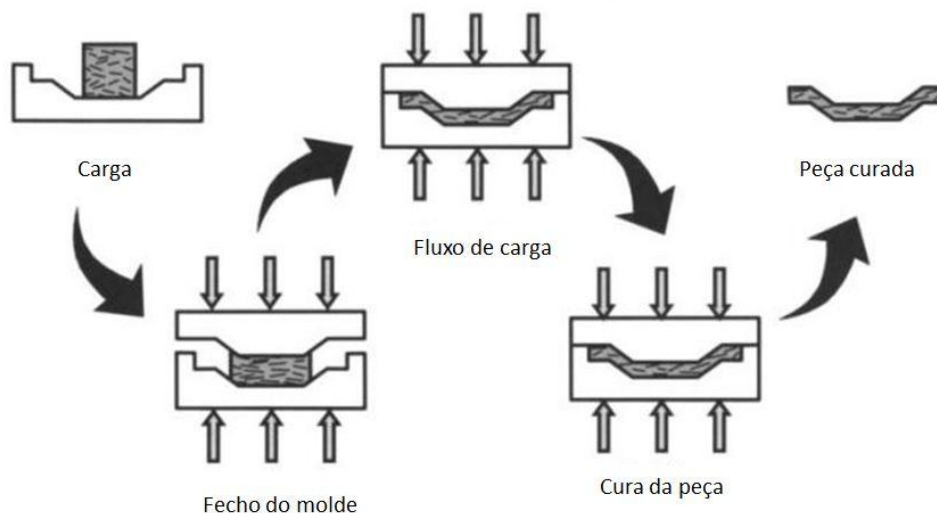


Figura 14- Processo SMC, baseado em (Campbell 2004).

3.4. Maquinagem de Materiais Compósitos

A maquinagem deste tipo de materiais é uma operação delicada, devido à heterogeneidade e anisotropia dos mesmos e, por isso, são necessárias ferramentas próprias para obter um bom acabamento. A orientação das fibras tem grande importância no comportamento do corte, bem como a temperatura durante a operação de corte que não deve exceder a temperatura de cura (nas resinas termoendurecíveis) para evitar a degradação do material. Já nas resinas termoplásticas, devem-se evitar temperaturas próximas das temperaturas de fusão, caso contrário pode ocorrer a obstrução da ferramenta de corte com consequências para o material circundante.

As fibras de vidro e aramida apresentam baixa condutibilidade térmica, o que pode originar excessivo aquecimento localizado, para isso, é importante o uso de um fluido de arrefecimento adequado durante o corte. Nos compósitos, 50% é absorvido pela ferramenta e a outra metade é absorvida pelas aparas e pela peça. Os compósitos de aramida, em particular, são muito eficazes e absorvem bastante energia durante o corte, o que implica uma superfície de corte irregular, por esta razão há maior dificuldade na maquinagem quando se trata de fibras de aramida. É difícil a obtenção de superfícies suaves e com bom acabamento, a maquinagem de materiais compósitos origina delaminagens junto à superfície de corte e nesse aspeto, a orientação e sequência de empilhamento das camadas têm grande influência (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

3.4.1 – Furação

Estudos realizados mostram que brocas pontiagudas originam uma penetração mais gradual, diminuindo assim a extensão das delaminagens. A força de avanço pode ser substancialmente reduzida através da realização de um pré-furo de menor diâmetro. Os laminados com camadas diferentemente orientadas apresentam melhores superfícies após a maquinagem do que os laminados unidireccionais (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

3.4.2 – Corte

O corte de materiais compósitos pode ser executado recorrendo a três métodos diferentes: i) o corte com serra, geralmente diamantadas para uma melhor resistência ao desgaste, produzindo uma melhor qualidade de corte; ii) com jato de água, esta é projetada a muito alta velocidade; quanto menor o diâmetro do orifício de saída da água melhor é a qualidade do corte; este processo reduz o pó prejudicial ao operador e o nível de ruído associado. E, por fim, iii) o corte com laser, que é executado a partir de um feixe concentrado de luz monocromática focado na peça a cortar. A necessidade de ventilação é importante devido aos fumos emitidos durante a operação e porque evita a queima da resina (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

3.5. Constantes de engenharia

No caso dos materiais compósitos, a camada é constituída por uma infinidade de fibras, a Micromecânica procura geralmente recorrer a modelos cujo comportamento seja representativo de toda a camada. É extremamente difícil medir algumas propriedades das fibras, sobretudo se estas são anisotrópicas, como é o caso das fibras de carbono e aramida. Normalmente encontram-se disponíveis o módulo e a tensão de rotura à tração longitudinais enquanto as propriedades transversais são frequentemente estimadas a partir de resultados de ensaios (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

A previsão das tensões de rotura é muito mais complexa do que as previsões das constantes elásticas. Para isso contribuem os efeitos de heterogeneidade local e os diferentes modos de rotura (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Os modelos que determinam as constantes de engenharia são de complexidade muito variável, mas baseiam-se em conjuntos de hipóteses como: i) fibra e matriz são os únicos constituintes, excluindo os vazios; ii) perfeita adesão interfacial fibra/matriz; iii) comportamento linear elástico para a fibra e para a matriz que se admite isotrópica; entre outros. Estes modelos podem ser enquadrados em categorias:

- 1) Modelos de mecânica dos materiais, que se baseiam na análise de uma célula elementar bidimensional, constituída por uma só fibra e envolvida por duas camadas de matriz. Quando solicitada longitudinalmente a célula elementar sofre deformação longitudinal e transversal. Recorre-se a este modelo para retirar o valor de E_1 e ν_{12} .
- 2) Modelo auto-consistente, considera uma célula elementar cilíndrica, embebida num meio homogéneo de propriedades equivalentes iguais às da célula. São realizadas análises de tensões em coordenadas cilíndricas e é utilizado para retirar o valor de G_{12} .
- 3) Método das células baseia-se numa análise 3D de uma célula elementar. A análise envolve a aplicação das condições de equilíbrio, bem como a determinação das propriedades em todas as direções do plano. Em seguida, procede-se ao cálculo dos valores médios de todas as propriedades nesse plano, de forma a satisfazer o requisito de isotropia transversal. Daqui resultam equações longas que, depois de alguma manipulação, permitem obter a equação para o cálculo de E_2 .

A partir dos modelos descritos, foram calculadas as constantes utilizadas neste estudo e que serão escritas mais à frente no documento de maneira a caracterizar os materiais utilizados.

3.6. Fadiga em compósitos

A fadiga é um tipo de solicitação que consiste na aplicação de cargas cíclicas abaixo do limite elástico dos materiais, e que provoca a formação e propagação de defeitos suscetíveis de provocar a rotura. Nos materiais homogêneos e isotrópicos⁴ a rotura por fadiga é ditada por iniciação e propagação de uma fenda ao passo que nos materiais compósitos ocorre uma acumulação generalizada de dano de natureza diversa: fissuração transversal e longitudinal, descoesão fibra-matriz, delaminação e rotura de fibras.

Os compósitos unidirecionais possuem uma boa resistência à fadiga na direção das fibras. Dependendo do valor máximo da tensão aplicada, dois mecanismos de dano podem ocorrer em compósitos unidirecionais. 1) Para cargas mais altas, o dano inicia-se pela rotura individual de algumas fibras devido à variabilidade estatística da resistência da fibra ao longo do seu comprimento. Isto origina zonas de concentração de tensões e promove mais roturas de fibras na vizinhança. Rapidamente, este fenómeno debilita o compósito resultando numa rotura catastrófica que ocorre após algumas centenas de ciclos. Para cargas de fadigas mais baixas, 2) as tensões na fibra são inferiores à sua resistência mas a deformação da matriz pode exceder o seu limite de fadiga. Neste caso, o dano inicia-se por rotura da matriz que induz descoesão fibra/matriz. Este processo ocorre de uma forma progressiva e, ao contrário da situação anterior, pode decorrer durante 10^6 ciclos. Para valores intermédios da solicitação o mecanismo de dano consiste numa mistura dos dois processos descritos. Assim, a rotura de algumas fibras induzem na vizinhança uma sobrecarga na matriz e na interface fibra/matriz, originando a descoesão entre ambas e a rotura da matriz.

Os compósitos multidirecionais apresentam menores rigidez e resistência que os unidirecionais relativamente à solicitação na direção das fibras. Como consequência, o mecanismo de dano é diferente e a sua sequência pode ser dividida em três fases. A primeira fase caracteriza-se por uma queda da rigidez que se justifica pelo aparecimento de rotura da matriz nas camadas com orientação diferente da solicitação. A iniciação do dano ocorre nas camadas cuja diferença de orientação é máxima relativamente à solicitação. Esta descoesão de fibra-matriz é favorecida pela diferença de rigidez e provoca microfissuras que, por coalescência, originam a rotura da matriz. Após a iniciação, a fissura propaga-se paralelamente às fibras e estende-se a toda a espessura das camadas. A densidade destas fissuras aumenta com o número de ciclos até à saturação. Quando as fissuras atingem as interfaces entre camadas diferentemente orientadas, estamos na segunda fase. Aqui, têm início as delaminações, cuja propagação rápida resulta na separação do laminado em camadas isoladas, o que promove a rotura de fibras das camadas alinhadas com a solicitação levando à rotura final (terceira fase).

Os ciclos de tração-compressão são geralmente críticos nos laminados multidirecionais. Assim, os picos de tração induzem à fissuração e à iniciação de laminagem e

⁴ Num material isotrópico as suas propriedades mecânicas são as mesmas em todas as direções do elemento estrutural. Num material ortotrópico, as suas propriedades mecânicas são as mesmas em duas direções e diferentes numa terceira, enquanto que num material anisotrópico, as propriedades diferem em todas as direções.

os de compressão são responsáveis pela propagação instável desta. Os compósitos multidirecionais apresentam menor resistência à fadiga que os unidirecionais quando a solicitação está alinhada com as fibras. A diminuição de resistência à fadiga é mais acentuada quanto maior for o ângulo entre a solicitação e as fibras.

Os compósitos de fibras curtas são muito menos resistentes à fadiga que os compósitos de fibras contínuas, uma vez que, nos primeiros a proporção de carga absorvida pela matriz é muito superior, o que facilita o aparecimento de dano. Este inicia-se por decoesão fibra-matriz das fibras orientadas perpendicularmente à solicitação.

Os compósitos de tecido apresentam mecanismos de dano similares aos multidirecionais, nomeadamente nos laminados cruzados do tipo [0/90]. Contudo, a sua resistência à fadiga é inferior devido à ondulação das fibras. De facto, as zonas de ondulação constituem fonte de iniciação de fissuração da matriz e delaminação (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

3.6.1 – Métodos utilizados

A rotura da camada é geralmente um processo complexo, que pode envolver plasticidade, formação e crescimento de fendas localizadas, sendo portanto difícil de prever. Apesar disso, a análise Micromecânica permite tirar conclusões úteis acerca dos mecanismos de rotura e das propriedades relevantes dos constituintes. Mais à frente irá perceber-se que são grandes as diferenças entre as resistências longitudinais e transversais. Os elevados valores de resistências longitudinais das fibras refletem-se na resistência dos compósitos.

O foco será na análise de resistências longitudinais de tração e compressão, que são de resto as mais importantes por duas razões fundamentais. Primeiro, porque são as mais elevadas, visto que beneficiam mais eficazmente do contributo das fibras. Segundo, porque nos compósitos multidirecionais, há todo o interesse em ter camadas orientadas nas direções das camadas principais, pois são estas que suportam a maior parte do esforço, dada a sua maior rigidez.

É necessário saber prever a rotura nas situações mais gerais, em que uma camada integra um compósito multidirecional, sujeito a solicitações multidirecionais. Idealmente, os critérios de rotura deveriam obedecer a dois requisitos algo contraditórios, defende (Moura, Morais, e Magalhães 2011):

- a) Interatividade plena, ou seja, a capacidade de ter em conta os efeitos de todas as componentes das tensões;
- b) Permitir a identificação do modo de rotura ao nível micromecânico, o que é particularmente importante ao nível da distinção básica entre roturas de fibras e roturas da matriz, pois são as primeiras que comprometem decisivamente a integridade global do laminado.

Existem variados critérios, estes dividem-se em famílias como: critérios não-interativos, que não têm em conta os efeitos combinados das várias componentes do tensor das tensões; os critérios interativos e os critérios parcialmente interativos, que visam atingir um compromisso entre a interatividade e a capacidade de distinguir modos de rotura.

Para ajudar na previsão da rotura do componente em estudo, recorre-se a dois métodos:

1) inicialmente, ao critério de rotura conhecido por *Tsai-Hill*, que está inserido na família dos critérios interativos que se exprime em função das tensões sob a forma de polinómio de segundo grau. Deriva do critério de *Hill* de cedência plástica dos metais, que por sua vez, foi desenvolvido a partir do critério de cedência de *Von Mises* para metais isotrópicos (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Para isso e segundo (Gay, Hoa, e Tsai 2002) pode recorrer-se à formulação de *Hill-Tsai number*, que define uma variável α igual a:

$$\alpha^2 = \left(\frac{\sigma_l}{\sigma_{lrot}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{trot}} \right)^2 - \frac{\sigma_l \sigma_t}{\sigma_{lrot}^2} + \left(\frac{\tau_{lt}}{\tau_{ltrot}} \right)^2$$

Se o valor de α for menor que a unidade não há rotura da camada. Se o seu valor for maior ou superior que um há rotura da camada.

2) O critério de *Hashin*, definido na família dos critérios parcialmente interativos, tem a capacidade de distinguir modos de rotura ao nível da fibra e da matriz. e é dividido em quatro modos de falha: a falha da fibra à tração e à compressão e a falha da matriz à tração e à compressão. Os valores relativos a este método serão obtidos através da simulação do *abaqus* e servirão como verificação de alguns valores obtidos pelo critério anteriormente descrito.

Todos os resultados serão apresentados mais à frente.

3.7. Green Composites

As preocupações ecológicas têm vindo a resultar num crescente interesse do estudo e aplicação dos materiais de natureza natural e biodegradável dando grande atenção aos problemas de reciclabilidade e comportamento ambiental levando à introdução de novos materiais compósitos mais amigos do ambiente.

Segundo (Koronis, Silva, e Fontul 2013) os *green composites* derivam de recursos renováveis com um potencial muito promissor já que reduzem o recurso ao petróleo. A mudança para construções mais sustentáveis na indústria automóvel é uma exigência dos regulamentos europeus, onde desde 2005 tem de ser reciclável 85% do peso do veículo. Dando ênfase às necessidades ambientais, resultaram o desenvolvimento de materiais compósitos de origens renováveis, onde se utilizam fibras naturais de origem vegetal, amigas do ambiente, com baixos custos, e como alternativa ao uso de fibras de vidro, combinando sempre que possível o uso de matrizes poliméricas biodegradáveis, desenvolvendo verdadeiros biocompósitos (Esteves 2009). Em 2015, a percentagem de produtos recicláveis aumentará para 95% do peso do veículo (Koronis, Silva, e Fontul 2013).

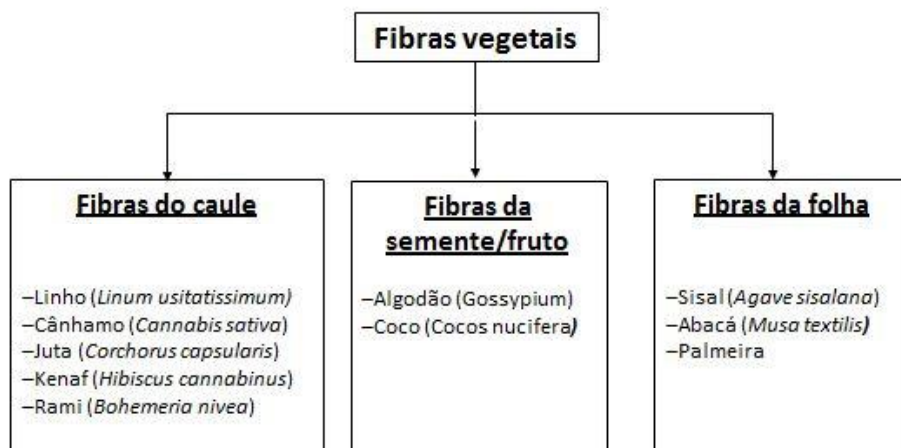


Figura 15- Classificação das fibras naturais (Esteves 2009).

Nos últimos anos tem havido um interesse crescente na substituição de fibra de vidro em compósitos reforçados com plástico por fibras vegetais naturais como Juta, Linho, Cânhamo e Sisal, por exemplo.

A natureza vegetal está cheia de exemplos onde células ou grupos de células se encontram desenvolvidas de forma a apresentarem grande resistência e rigidez. Estas células podem ser encontradas, como referido na Figura 15:

- Nos caules - estas fibras estão associadas ao tecido vascular do floema e são constituídas por uma única faixa de fibras, com várias camadas de espessura. As fibras são extraídas em feixes, constituídos por várias fibras individuais continuamente sobrepostas.
- Nas folhas - estão associadas aos tecidos vasculares. São também extraídas em feixes constituídos por várias fibras elementares continuamente sobrepostas.
- Nos frutos das plantas - não são mais que pêlos epidérmicos provenientes de sementes e frutos, respetivamente (Esteves 2009).

Têm vantagens como: i) a baixa densidade (as fibras de vidro possuem uma densidade duas vezes superior); ii) elevada relação comprimento/diâmetro; iii) natureza não abrasiva (não danificam ferramentas, nem são prejudiciais à saúde); iv) facilmente reciclável; v) natureza renovável (disponível em grandes variedades e quantidades); vi) biodegradável, com baixo consumo energético e com elevada flexibilidade no processamento de compósitos e, também, vii) baixo custo.

Como desvantagens é possível escrever que têm uma temperatura de processamento limitada (200 - 300°C) com emissões voláteis, com consequente perda de cor e redução das propriedades mecânicas do compósito; têm elevada capacidade de absorção de humidade, que compromete a estabilidade dimensional dos compósitos; com fraca adesão interfacial com alguns polímeros; de qualidade variável, dependente de influências imprevisíveis como as condições climáticas, o que se traduz na variabilidade das propriedades físicas e mecânicas da fibra e com preço variável (Esteves 2009).

São exemplos os casos da: 1) Mercedes que utiliza uma matriz epóxico com adição de Juta nos painéis das portas nos veículos da classe E desde 1996; 2) a Ford e a BMW que também já utilizam materiais naturais no interior das portas de alguns veículos e 3) a Toyota

que desenvolveu um plástico ecológico a partir de cana-de-açúcar que é usado para alinhar o interior dos automóveis (Koronis, Silva, e Fontul 2013).

3.8. Reciclagem de materiais Compósitos

- Reciclável é o grau de potencial de um produto que pode ser reciclado no fim da sua vida (Parlamentosu e Konseyi 2005).

A utilização crescente de materiais compósitos conduz naturalmente ao aumento de componentes que estão fora de serviço (obsoletos). Atualmente o depósito em aterros é o destino da maioria dos resíduos de materiais compósitos. Todavia, como os plásticos, os compósitos não são biodegradáveis quando depositados num aterro e apresentam vida quase infinita causando poluição ambiental.

As técnicas atualmente mais usadas para a reciclagem de compósitos são: i) a trituração que é um processo de reciclagem secundário, onde os resíduos do compósito são cortados num tamanho adequado para servirem como cargas noutras aplicações; no caso dos compósitos de matriz termoplástica, os materiais resultantes são usados nos processos de moldação por injeção ou compressão, já os compósitos de matriz termoendurecível são utilizados como cargas nos compostos de moldação; ii) a pirólise, as fibras são separadas e reutilizadas como reforços ou cargas, nomeadamente nos compostos de moldação; iii) a incineração pode ser considerada um processo de reciclagem desde que a energia produzida seja aproveitada para outros fins. E finalmente, iv) a dissolução por ácidos, que consiste no uso de produtos químicos para dissolver o polímero (Moura, Moraes, e Magalhães 2011).

Com este capítulo pretende-se dar a conhecer as características dos materiais que são alvo neste estudo. Referir as suas vantagens e desvantagens.

No capítulo seguinte serão abordadas questões como, valores de propriedades mecânicas e a quantificação de propriedades de materiais que pertencem a esta grande família que são os materiais compósitos.

4 Seleção de Materiais

No que concerne à seleção de materiais, encontra-se normalmente uma problemática comum, minimizar os custos das matérias-primas maximizando o desempenho do produto. A utilização de uma combinação de materiais é um processo mais complexo do que a utilização de um único material.

No *design* automóvel é amplamente aceite que o uso de vários materiais possa reduzir o peso sem o aumento de custo, o que se tem verificado complicado se pensarmos na utilização de materiais compósitos (Sakundarini et al. 2013). Na Figura 16 pode perceber-se quantitativamente quais os materiais fazem parte de um automóvel.

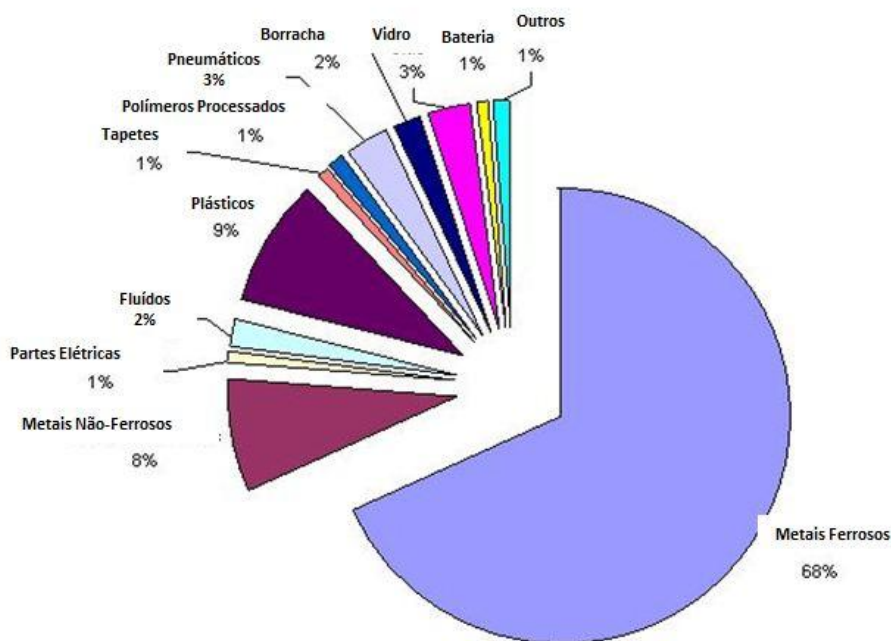


Figura 16- Principais constituintes de um automóvel, adaptado de (Yang et al. 2012).

É importante o conhecimento dos processos de fabrico dos materiais compósitos, bem como os diferentes materiais que o constituem e como estes se relacionam com todos os componentes que se pretendem desenvolver.

Segundo (Ashby 2002) para a seleção de um material, é importante começar com o maior número de opções de materiais. É necessário identificar os perfis e os seus atributos, compará-los com os perfis que já existem e encontrar uma melhor correspondência. Não deve ser esquecida a identificação das restrições que ajudará na convergência da seleção de materiais.

Segundo (Cramer, Taggart, e Inc 2002) não se deve descurar a: i) minimização da quantidade total de material; ii) simplificação da montagem, das ferramentas, do processamento e do custo de projeto; iii) integração de toda a funcionalidade possível na estrutura.

No caso de um elemento estrutural a sua performance é determinada por: 1) requisitos de funcionamento; 2) geometria e 3) propriedades do material (Ashby 2002).

4.1. Caracterização geral dos materiais compósitos

As figuras referentes a este subcapítulo encontram-se no ANEXO A, já que são imagens que necessitam de estar grandes para a sua melhor compreensão e que não se tornava prático tê-las ao longo do texto.

4.1.1. Módulo de Young

O módulo de *Young* ou módulo de elasticidade define a rigidez de um material sólido. É uma propriedade intrínseca do material que depende da composição química, da microestrutura e dos defeitos. É a razão entre a tensão exercida e a deformação sofrida pelo material. No caso dos materiais compósitos, a fibra normalmente tem um módulo superior ao da matriz. Nestes casos é dado por uma média ponderada da rigidez dos dois componentes, dependendo da fração de volume das fibras.

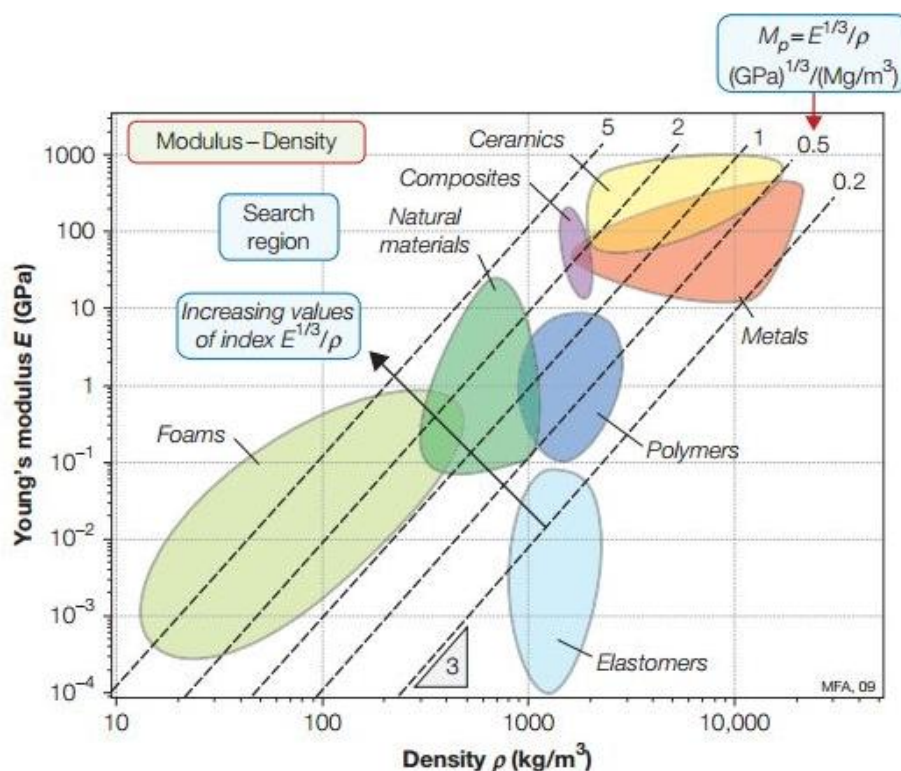


Figura 17- Módulo de *Young* dos materiais compósitos (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007).

Para a análise desta figura e abordagem a esta característica tão importante de todos os materiais, é necessário chamar à atenção para as linhas diagonais da Figura 17 que são relativas ao valor de M_p , que mais não é do que a razão entre a raiz cúbica do módulo de *Young* e a densidade. Desta forma, é possível perceber a principal diferença entre os metais e

os materiais compósitos, onde um material com $M_p=2$ (linha que cruza a família dos materiais compósitos) dá origem a um painel que tem um décimo do peso de um com $M_p=0.2$ (linha que cruza a família dos materiais metálicos). Apesar disso, apresenta a mesma rigidez. É possível, analisando ainda esta figura perceber que existem materiais metálicos e materiais compósitos que, apresentando a mesma rigidez, tenham densidades bem distintas, ou seja, com a utilização de materiais compósitos consegue-se diminuir a densidade de um componente, mantendo a rigidez do mesmo quando fabricado por materiais metálicos.

4.1.2. Resistência à tração

Pela Figura 51 (ANEXO A) é possível perceber que os materiais compósitos, no que toca à resistência à tração, se encontram na linha diagonal de 0,01, ou seja, com resistências tão boas como os melhores dos metais, como é o caso dos alumínio (Ashby 2002). Tudo isto é bom indicador para o trabalho a realizar, já que se trata do *design* de um elemento estrutural, tradicionalmente fabricado em aço, onde é vital manter todas as características que garantam a segurança dos passageiros.

4.1.3. Eficiência mecânica⁵

Os materiais compósitos, mais especificamente os CFRP (fibras de carbono reforçadas com polímeros), que se encontram mais no canto superior direito na Figura 52 (ANEXO A). Eles emergem como a classe de materiais mais atrativa, daí a sua crescente utilização em indústrias como a aeroespacial (Ashby 2002). Estes materiais têm uma grande apetência para suportar trabalhos estruturais, como é o caso de um chassis, tendo a vantagem de ter menor massa do que os materiais comumente utilizados.

4.1.4. Resistência à fadiga

Um dos aspetos mais importantes que influenciam o comportamento à fadiga dos materiais compósitos é o tipo de material. A resistência à fadiga aumenta com o módulo das fibras que, no caso dos compósitos unidireccionais desempenham um papel preponderante no comportamento à fadiga. As fibras de alta rigidez, como é o caso do carbono e do boro, limitam a deformação no compósito e evitam as deformações elásticas e viscoelásticas na matriz que são precursoras do dano. Por outro lado, as fibras de baixo módulo, como é o caso do vidro, permitem a existência de deformações suscetíveis de originar dano prematuro na matriz. As fibras aramídicas apresentam um comportamento intermédio entre os dois casos anteriores, uma vez que as próprias fibras são afetadas pela solicitação. No que respeita às resinas, o fator preponderante é a deformação à rotura. As resinas epoxídicas apresentam o melhor comportamento à fadiga que se justifica pela sua tenacidade, durabilidade, boa resistência mecânica, baixa contração durante o processo de cura e boa adesão com as fibras, nomeadamente com as de vidro (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

⁵ Tem como designação a apetência de determinado material com menor massa conseguir suportar um trabalho estrutural (Ashby 2002)

4.1.5. Resistência à fratura

A resistência à fratura pode definir-se como a capacidade que um determinado material tem de suportar um esforço até fraturar.

Na Figura 53 (ANEXO A) os materiais que estão para o lado superior direito, que é o caso dos materiais compósitos, têm alta resistência e baixa tenacidade, eles fraturam antes de ceder. O contrário acontece com os materiais que estão em direção ao lado esquerdo, eles cedem antes de fraturar (Ashby 2002).

Pode perceber-se por esta rápida análise que os materiais compósitos estão próximos dos materiais metálicos, e isto acontece até nas propriedades mais vitais dos materiais.

Com este tópico pretende-se dar a conhecer as principais características dos materiais compósitos, o que permite concluir que é possível a utilização desta família de materiais na construção de um componente estrutural como é o chassi de um automóvel. De seguida, serão caracterizados mais especificamente, materiais compósitos que poderão corresponder às características necessárias para o fabrico do componente em estudo.

4.2. Fibra de Vidro

As fibras de vidro constituem o tipo de reforço mais utilizado. O seu teor alcalino é o principal responsável pela sua resistência ao envelhecimento, quando com teores inferiores a 14% apresentam alterações menos significativas em contacto com agentes atmosféricos ou químicos. Assim, a fibra do tipo A, fortemente alcalina, foi sendo progressivamente substituída pela fibra do tipo E, um vidro de borosilicato com baixa quantidade de compostos alcalinos, já que apresenta boas propriedades elétricas, mecânicas e químicas (Marques 2013). É um compósito útil para aplicação em ambientes corrosivos cuja temperatura de serviço se encontra entre os 200 e os 300°C, quando utilizada como reforço. São fibras de baixo custo (Campbell 2004).

Existem também as fibras do tipo S e R que são produzidas a partir de vidros de alta resistência e são muito aplicadas na indústria aeronáutica (Marques 2013). São produzidas por estiramento de vidro fundido através de uma fieira em liga de platina-ródio com orifícios de dimensões muito precisas, a temperatura de fusão ronda os 1260°C. A estes filamentos é posteriormente feito um revestimento têxtil para o fabrico de tecidos sem risco de dano da fibra, ou um revestimento plástico para permitir a adesão da fibra com as matrizes. São fibras fortemente higroscópicas. As suas propriedades estão quantificadas na Tabela 4.

Tabela 4- Propriedade da Fibra de Vidro (Cramer, Taggart, e Inc 2002; EduPack 2013).

<i>Propriedades</i>	<i>Vidro E</i>	<i>Vidro S</i>	<i>Vidro R</i>
Densidade (g/cm ³)	2,6	2,49	2,55
Módulo de <i>Young</i> (GPa)	73,0	85,5	86,0
Tensão de rotura (MPa)	3400	4580	4400
Deformação na rotura (%)	4,4	5,3	5,2
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	5,0	2,9	4,0

4.3. Fibra de Carbono

As fibras de carbono podem ser divididas em dois grupos, 1) as fibras de carbono com percentagens de carbono entre os 80 e os 95% e 2) as fibras de grafite, onde a percentagem de carbono chega aos 95%. São utilizadas em aplicações exigentes como a aeronáutica e na indústria aeroespacial.

A produção de fibras de carbono centra-se na decomposição térmica de vários precursores orgânicos. Podemos apresentar três: i) as fibras produzidas a partir da celulose (*rayon fibers*) que exigem elevadíssimas temperaturas de grafitação, tornando o processo muito dispendioso; ii) poliacrilonitrilo (PAN) o precursor atualmente mais utilizado; e iii) as fibras produzidas a partir do alcatrão (*Pitch*), que apresentam propriedades mecânicas inferiores (Marques 2013). As suas distintas propriedades estão retratadas na Tabela 5.

Tabela 5- Propriedades das Fibras de Carbono (Cramer, Taggart, e Inc 2002; Marques 2013).

<i>Propriedades</i>	<i>PAN</i>	<i>Pitch</i>	<i>Rayon fibers</i>
Densidade (g/cm ³)	1,8	2,0	1,7
Módulo de <i>Young</i> - E _F (GPa)	200-400	400	415-680
Tensão de rotura (MPa)	2480-3100	1550	2070-2760
Deformação na rotura (%)	0,6-102	1-1,5	0,5-0,6
Coefficiente de expansão térmica axial (10 ⁻⁶ /°C)	-0,7 a -0,5	-1,6 a -0,9	-

As fibras de carbono são designadas com base na sua resistência mecânica e comercializadas segundo a seguinte designação:

- i) UHM - para fibras com módulos superiores a 500 GPa;
- ii) HM - para fibras com módulos superiores a 300 GPa e rácio resistência mecânica/módulo em tração inferior a 1%;
- iii) IM - para fibras com módulos até 300 GPa e rácio resistência mecânica/módulo em tração de cerca de 1%;
- iv) Fibras de baixo módulo - com valores inferiores a 100 GPa;
- v) HT - para fibras de resistência à tração superiores a 3000 MPa e rácio resistência/rigidez entre 1,5 e 2% (Marques 2013).

4.4. Fibra de Aramida

As fibras aramídicas são produzidas a partir de poliamidas aromáticas. A solução de polímero é mantida a baixa temperatura (entre os -50°C e os 80°C), sendo depois extrudada a uma temperatura próxima dos 200°C. Por este método a cadeia molecular é alinhada conseguindo-se uma melhoria das propriedades mecânicas. Desta família, as mais conhecidas, são as designadas comercialmente KEVLAR® (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

Apresentam propriedades como a resistência e rigidez intermédias, entre as fibras de vidro e de carbono (Campbell 2004). Para além disso, apresentam excelente resistência química, mecânica, ótima relação rigidez-peso, boa resistência ao impacto e à fadiga e boa capacidade de amortecimento de vibrações. O seu coeficiente de dilatação tem um comportamento idêntico ao das fibras de carbono. As suas desvantagens são as baixas

resistências à flexão e compressão, bem como a elevada sensibilidade ao corte interlaminar (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

A resistência à compressão de polímeros à base de fibra de carbono, vidro e aramida equivalem a 78%, 55% e 20% da resistência à tração destes materiais, respetivamente. As fibras de aramida apresentam um comportamento não linear à compressão axial de polímeros à base de fibra de aramida equivalente a apenas 20% da sua resistência à tração. Portanto, se por algum motivo um elemento estrutural reforçado com fibras de aramida for submetido a tensões de compressão o seu desempenho será muito inferior ao de um elemento estrutural reforçado com os outros tipos de fibras. Isto desfavorece as fibras de aramida (Perelles, Medeiros, e Garcez 2013).

Embora as fibras de aramida possuam rigidez intermédia, entre as fibras de carbono e de vidro, o mesmo não pode ser dito em relação ao seu comportamento à fadiga, já que estas fibras são sensíveis aos danos causados (Perelles, Medeiros, e Garcez 2013).

Tabela 6- Propriedades das principais fibras, adaptado de (Marques 2013; Cramer, Taggart, e Inc 2002).





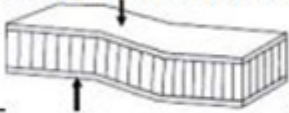


<i>Fibras</i>	ρ (Mg/m ³)	ε_r (%)	E_F (GPa)	σ_{tf} (MPa)	E_F/ρ	σ_{tf}/ρ	<i>Coef. de dilatação linear</i> (10 ⁻⁶ K ⁻¹)
<u>Polietileno</u>							
<i>Spectra 900</i>	0,97	-	117	2585	121	2665	-
<i>Spectra 1000</i>	0,97	-	172	2964	177	3056	-
<u>Vidro</u>							
E	2,54	3-3,5	70	2200	276	866	3-5
S	2,53	4,1	86	3500	339	1383	4
R	2,5	3,5-4	86	3200	344	1280	-
A	2,7	-	75	1700	277	666	-
<u>Aramida</u>							
<i>Kevlar 29</i>	1,44	3,7	59	2600	41	1833	-5
<i>Kevlar 49</i>	1,45	2,9	130	2900	89,7	2000	
<i>Kevlar 149</i>	1,47	-	146	2410	99,3	1639	
CFRP	1,68	0,02	95	19	56,5	11,31	5
<u>Carbono PAN</u>							
HS	1,80	2,0	230	4500	128	2500	-0,1
IM	1,76	1,1	290	3100	165	1761	-0,5
HM	1,86	0,7	380	2700	204,3	1452	-1,2
UHM	1,94	0,7	588	3920	303	2021	-0,9
<u>Pitch</u>							
P-25W	1,90	0,9	160	1400	84,2	737	-
P-75S	2,00	0,4	520	2100	260	1050	-1,4
P-120 S	2,18	0,3	827	2200	379	1009	-1,25

4.5. Estruturas Sanduiche

Estas estruturas são compostas por duas faces exteriores finas, mas com elevada resistência estrutural e um núcleo bastante mais espesso, com uma resistência mais baixa e o mais leve quanto possível. O núcleo separa as duas faces que são coladas utilizando adesivos. As faces podem ser formadas por metais como o aço ou alumínio, bem como por materiais como a madeira ou laminados de compósitos. Para o núcleo são usados materiais como a balsa, espumas poliméricas de baixa densidade, cortiça, favos de abelha, entre outros.

Relativamente ao seu comportamento mecânico este tipo de estruturas assemelha-se aos perfis em I, onde os banzos são as faces da sanduiche e a alma o seu núcleo. Assim, são as faces que suportam os esforços de flexão a que a estrutura está sujeita e o núcleo evita o deslizamento das faces, suportando os esforços de corte.

Tabela 7 - Falhas das estruturas sanduiche, adaptado de (Almeida 2013; Broughton, Crocker, e Gower 2002).

Modo de Falha	Causas
Esmagamento local do núcleo 	A resistência à compressão do núcleo é baixa.
Enrugamento local 	A resistência ao corte, do núcleo, é baixa ou quando a espessura do painel é baixa.
Enrugamento geral 	A resistência ao corte, do núcleo ou do adesivo, é baixa; ou devido a um enrugamento local.
Enrugamento das faces 	<ul style="list-style-type: none"> - Enrugamento para dentro: Falha à compressão do núcleo; - Enrugamento para fora: falha nos adesivos;
Falha causada pelo esforço transversal 	A resistência ao corte do núcleo é baixa ou quando a espessura do painel é insuficiente.
Falha das faces 	Resistência ou Espessura das faces insuficientes.
Instabilidade local 	Ocorre quando as faces são muito finas em relação à célula. Pode causar falha se se propagar para células adjacentes.

Quando se utilizam este tipo de materiais, vários tipos de falhas podem ocorrer, sendo a informação transmitida através da Tabela 7 (Davies et al. 2001). É importante a informação desta tabela porque todos estes casos de falha, aquando da construção e utilização de estruturas sanduiche, devem ser tidos em conta no processo de *design*.

De entre as principais vantagens de utilização de estruturas sanduiche é importante destacar a elevada resistência e rigidez específica da estrutura resultante, o bom comportamento à flexão, o seu baixo peso e as suas boas propriedades de resistência ao impacto. Garantem o bom isolamento térmico e acústico e permitem a obtenção de geometrias complexas (Almeida 2013).

Existem problemas de reciclagem no final da sua vida útil e na sua fase de produção.

A construção com um composto de matriz polimérica é mais frequente, usando cura em autoclave. Os ciclos de cura podem ser desenvolvidos para produzir painéis de boa qualidade.

4.5.1 – Estruturas sanduiche e manutenção

Depois do fabrico, a inspeção é um ponto muito importante, quer visualmente, quer mecanicamente, seja qual for o tipo de componente, estrutural e/ou de uso corrente. A inspeção preventiva diminui tempos de produção e permite a manutenção de componentes de uma forma mais rápida. Com uma estrutura sanduiche há dificuldades de inspeção associadas, é o caso da penetração de fluídos no núcleo. As configurações estruturais em sanduiche podem ser muito eficientes a partir de um ponto de vista de desempenho, mas tendem a ser frágeis e facilmente danificadas e difíceis de inspecionar (Ashby 2002).

4.6. Algumas soluções

(Ashby 2002) apresenta algumas soluções, para o aumento da resistência ao dano que se considera relevante quando necessário para o processo de desenvolvimento:

- i) Deve-se aumentar a espessura dos laminados, ou em estruturas sanduiche optar por um núcleo mais denso.
- ii) A seleção de fibras de reforço que têm elevada capacidade de deformação pode ter um efeito positivo.
- iii) A construção da estrutura sanduiche em favo de mel geralmente resulta numa configuração mais resistente ao dano.

A construção em sanduiche é um método para obter uma elevada rigidez à flexão com um peso mínimo. Para uma boa construção estrutural é preciso ter em atenção:

- 1) A qualidade das superfícies;
- 2) Qualidade dos adesivos;
- 3) Força do núcleo.

Este quarto capítulo foi referente à seleção de materiais, etapa muito importante num processo de *design*. Foi transmitida a importância dos materiais compósitos e as suas boas características, para além disso foram caracterizados materiais que fazem parte desta família e que mais tarde farão parte das simulações. Ultrapassada esta fase e sabendo quais as propriedades características destes materiais é necessário entender como é que estes se comportam aquando do projeto e da sua produção. Nesta fase serão apresentados também os dois modelos de chassi utilizados para este estudo.

5 Design do Chassi

Nesta secção pretende-se demonstrar a evolução e a construção dos modelos projetados. As diferentes modelações foram feitas no *software Solidworks*. A ideia nesta fase do projeto foi estudar os diferentes *designs* de forma a encontrar a melhor solução para aplicar os materiais compósitos.

Ter um chassi bem concebido é importante para garantir segurança, desempenho e controlo técnico do veículo (Mat e Ghani 2012).

Um facto que deve ser tido em conta no projeto com materiais compósitos é a necessidade de desenvolver novas soluções de raiz e nunca tentar concretizar um projeto que passe pela mera substituição dos componentes metálicos, sendo que será esse o ponto de partida.

É preciso ter noção que num processo de *design* e conceção, os requisitos de suporte são sua parte integrante no desenho e processo logístico para apoiar o sistema durante o seu funcionamento ou vida útil. Os requisitos de apoio incluem as ferramentas, equipamentos, instalações, peças, técnicas, documentação, dados, materiais e análise que asseguram que um componente compósito mantém a sua integridade durante a sua vida útil prevista.

Quando a capacidade de carga de um produto é comprometida, a sua reparação deve ser feita com o menor custo possível. As exigências dos consumidores podem ditar a filosofia de manutenção e a capacidade de reparação que uma equipa de conceção deve incorporar no processo de *design*. No projeto de um produto é importante a concentração na variedade de recursos que melhoram a capacidade de suporte, incluindo a compatibilidade dos materiais de reparação, os equipamentos disponíveis, melhorando a acessibilidade e aumentando a vida do produto (Ashby e Cebon 1993).

5.1. Projetar em materiais compósitos

Conceber em materiais compósitos obriga ao conhecimento de materiais, estruturas e fabrico. É um projeto multidisciplinar. Por isso, é necessário ter em atenção diversos fatores, entre os quais se destacam, as variações de raios e espessuras têm de ser suaves para evitar locais de descontinuidade, concentração de tensões e/ou solicitações parasitas. Quando se trata de ligações é necessário ter em atenção as diferenças entre os coeficientes de dilatação dos diferentes materiais.

5.2. Ligações

A utilização generalizada de materiais compósitos em estruturas exige frequentemente o estabelecimento de ligações entre diferentes componentes. Estas ligações, usualmente designadas por juntas, podem ser usadas entre dois componentes de materiais compósitos, ou

por exemplo, entre um componente metálico e um compósito. O pré-requisito fundamental de uma ligação eficiente é a transmissão de carga entre os dois componentes, mantendo a sua integridade estrutural sobre solicitações estáticas ou dinâmicas e sob condições ambientais adversas. De uma forma geral as juntas constituem zonas de potencial colapso da estrutura (Marques 2013).

Os apoios do chassi são ligações aparafusadas. Para o *design* do chassi, é preciso perceber como é que estas ligações se comportam quando aplicadas em materiais compósitos. Normalmente são relatadas ligações do tipo aparafusadas e rebitadas, como muito usadas em materiais compósitos, nomeadamente em estruturas aeronáuticas.

Assim, dentro das ligações aparafusadas e rebitadas é possível definir dois tipos, apresentados na Figura 18:

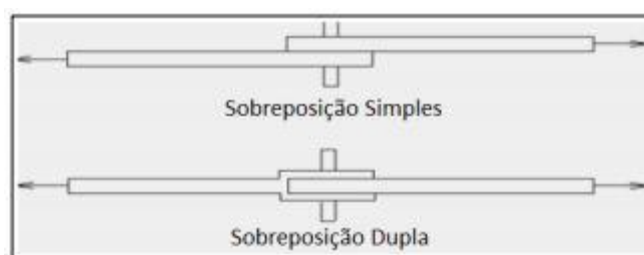


Figura 18- Tipo de ligações, retirado de (Marques 2013).

Este tipo de estruturas não requer a preparação prévia das superfícies; não são afetadas por ciclos térmicos a ambientes húmidos; têm um bom desempenho sob solicitações de tração e permitem uma fácil inspeção visual para a deteção de dano ou desgaste.

Como desvantagens salienta-se o facto da execução do furo interromper a continuidade das fibras e reduzir a resistência dos substratos; induzem, também concentração de tensões nos componentes o que pode propiciar a rotura (Figura 19).

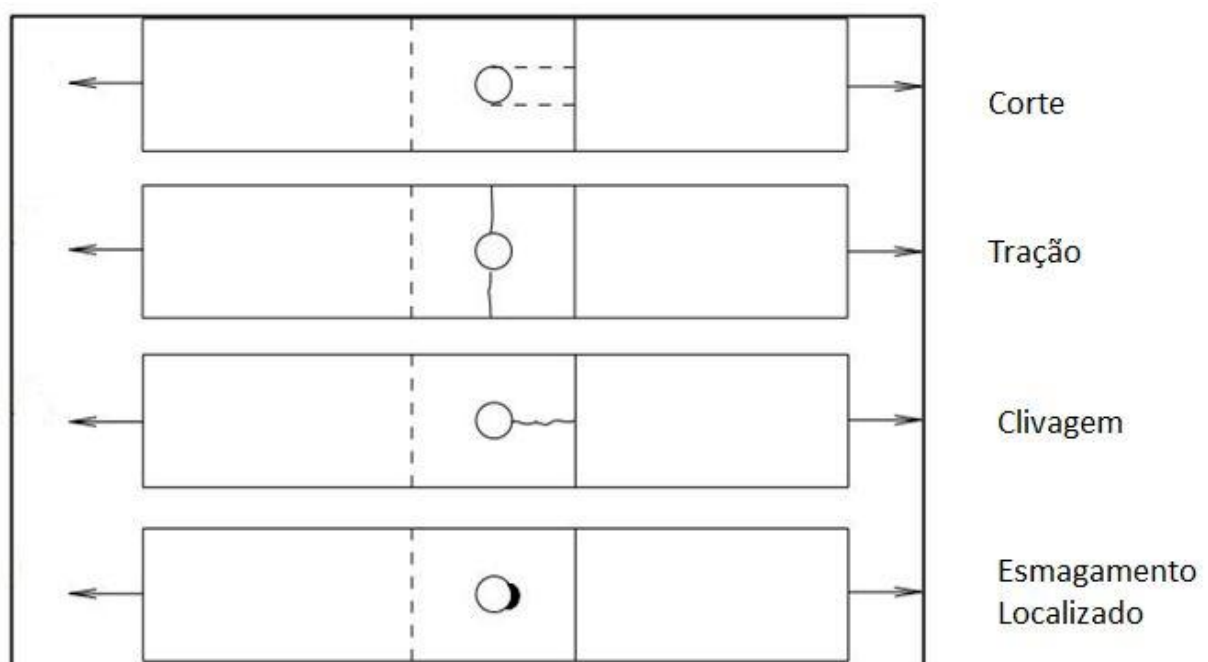


Figura 19- Modos de rotura e suas causas, adaptado de (Marques 2013).

Está relatado que o melhor desempenho é da sobreposição dupla, com resistência superior em 20%. Existem mais fatores que influenciam a resistência mecânica das ligações:

- 1) As orientações das fibras de cada camada e as sequências de empilhamento;
- 2) Os métodos de fabrico, a qualidade do furo, bem como o seu material circundante.

O modo de rotura depende de fatores, como: a) do tipo de fibra; b) da sua orientação; c) da sequência de empilhamento; d) das propriedades da matriz e da e) geometria da junta.

Os modos de rotura por corte e tração são os considerados catastróficos e, por isso, devem ser evitados. A rotura por esmagamento localizado é não catastrófica, por isso, este tipo de ligações é recomendável. Para que possa acontecer este modo de rotura deve-se manipular a geometria de maneira a que as relações e/b e w/b sejam superiores a 3 e 6, respetivamente. Os parâmetros e , b e w estão demonstrados na Figura 20.

As roturas por corte e clivagem são típicas de laminados unidirecionais ou com grande preponderância de camadas orientadas a 0° . Um método utilizado para evitar este tipo de rotura é o uso de camadas a $\pm 45^\circ$, contudo, um número excessivo deste tipo de camadas reduz a resistência à tração da junta.

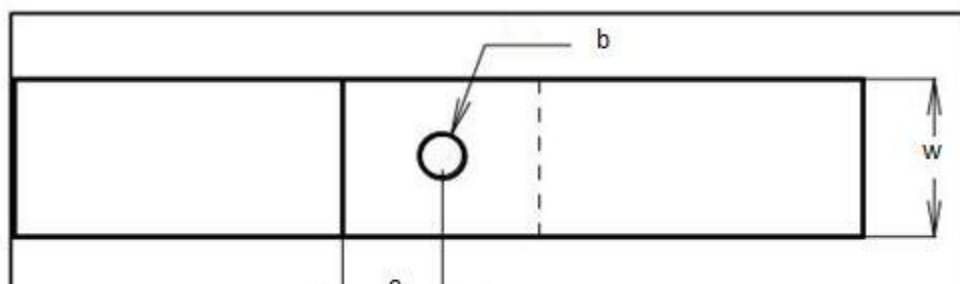


Figura 20- Definição dos parâmetros " e ", " b " e " w ", adaptado de (Marques 2013).

Para além deste tipo de ligações, podem referenciar-se também as ligações com adesivos, que têm vantagens como o facto de diminuir: i) a concentração de tensões, proporcionando um melhor desempenho sob solicitações à fadiga; 2) as vibrações, a natureza viscoelástica do adesivo promove o amortecimento das mesmas; 3) o número de peças e 4) o peso. Permite a obtenção de contornos mais suaves e é um processo económico e rápido, sendo fácil de automatizar aumentando, dessa forma, as cadências de produção e a redução de custos. Contudo, é necessário um tratamento prévio das superfícies; os ciclos de cura de alguns adesivos são longos; são de difícil inspeção; são ligações de carácter definitivo, não permitindo a desmontagem sem dano; requer mão-de-obra bem treinada. Os modos de ligações coladas estão indicados na Figura 21.

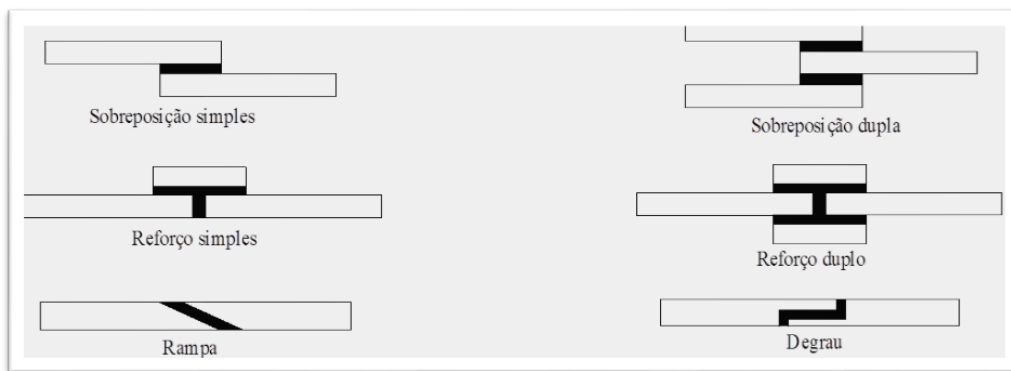


Figura 21- Modos de ligações coladas mais frequentes, retirado de (Marques 2013).

A ligação colada mais frequente, pela simplicidade de execução é a junta de sobreposição simples, em que a carga é transmitida entre substratos por tensões de corte nos adesivos. Todavia, a aplicação descentrada da carga provoca efeitos de flexão, reduzindo a resistência da junta. Para minimizar este problema, pode-se recorrer a juntas de sobreposição dupla, em que os efeitos de flexão são consideravelmente inferiores. As juntas com reforço simples ou duplo também apresentam maiores resistências que as juntas de sobreposição simples. Ainda assim, as juntas em forma de degrau ou rampa apresentam resistências mais elevadas. Contudo, a dificuldade de as maquinar, tornam a sua realização mais complicada, encarecendo, também o processo de fabrico.

Na Figura 22 distinguem-se três tipos de rotura das juntas coladas:

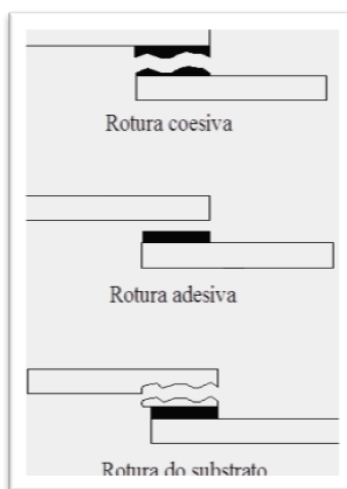


Figura 22- Modos de rotura de ligações coladas, retirado de (Marques 2013).

A rotura coesiva ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo. Em muitos casos a rotura adesiva é confundida com a rotura coesiva. A rotura de um dos substratos é demonstrativa de uma junta bem concebida, nomeadamente se a carga de rotura corresponder à resistência nominal do substrato.

No caso de utilização deste tipo de juntas é de ter em atenção que existem regras para o projeto.

Para além destes dois tipos de ligação, existe a ligação exclusiva dos compósitos de matriz termoplástica, que é a ligação por fusão, estabelecida por aplicação de calor e pressão adequada, de modo a que ocorra a difusão do polímero na interface. Neste tipo de junta, o

tratamento superficial necessário é mínimo; apresentam boa ductilidade e são reparáveis facilmente; têm boa resistência à humidade e boa resistência química; têm tempos de processamento e custos inferiores às juntas coladas com termoendurecíveis. A principal desvantagem deve-se à necessidade de pressões e calor externos, que sendo um processo automatizado requer equipamento adequado (Marques 2013).

5.3. Curvas em Compósitos

Como já foi dito anteriormente, curvas e formas complexas em compósitos podem ser um ponto crítico e de ter em atenção devido à concentração de tensões que podem surgir. Além disso, é de referir, que sendo o chassi um componente com muitos detalhes, projetá-lo na sua forma original em materiais compósitos obrigaria a um molde muito mais complexo, e depois de obtido este componente, seria um custo acrescido maquinar o mesmo. Dependendo do material, isto poderia tomar valores ainda maiores, mas pensando que as operações de maquinagem com outro modelo de chassi podem ser diminuídas, em termos industriais, tempo é dinheiro e reduzir esse tipo de operações será sempre uma grande vantagem. Para isso, e por isso, na secção seguinte deste documento será apresentada uma proposta para um modelo compósito que permite reduzir esse número elevado de maquinagens.

Além disso, no caso da produção do chassi, no decorrer do processo de arrefecimento após a cura do compósito e para, por exemplo, fibra de carbono epóxico, verifica-se que o coeficiente de expansão transversa é bastante superior ao coeficiente de expansão. E neste caso não seria muito favorável a realização de um componente com formas curvas, já que sofreria intensamente do fenómeno de “spring in” após a cura. Este fenómeno pode ser diminuído quando se faz um reaquecimento após a cura.

5.4. Modelos

O processo iniciou-se com o desenho e modelação do chassi original, o que foi facilitado pelo facto de o modelo físico estar disponível.

5.4.1 – Modelo Original

Isto foi permitido porque houve um modelo físico disponível. Este chassi foi desenhado à escala real (Figura 23). De seguida são apresentadas imagens do resultado final, deste primeiro modelo.

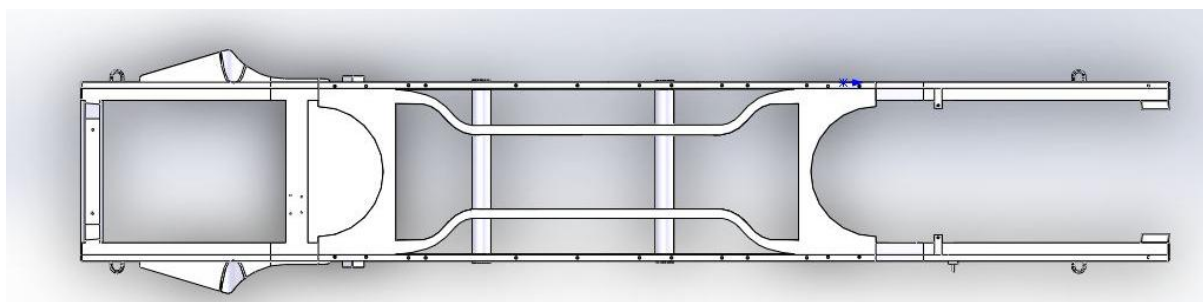


Figura 23- Vista superior do chassi original (Solidworks).

5.4.2 – Segundo Modelo

Para a construção deste segundo modelo, foi necessário perceber se as faltas de material da estrutura original se deviam apenas à economia de peso, ou se haveria componentes que obrigariam a essa geometria. Através da análise visual do modelo original foi possível constatar que não haveria qualquer problema em fechar a geometria. Isto foi visto como uma vantagem, já que trabalhar formas curvas e geometrias complexas em compósitos é difícil, e desta forma, a produção do chassi estaria facilitada. O pensamento para a construção deste modelo, apresentado na Figura 24, foi minimizar as geometrias complexas e tentar que se tratasse de uma estrutura o mais simples possível e para isso, foi introduzida uma placa a ligar as longarinas. Esta placa de material intercepta as longarinas no seu eixo central e muda de plano devido aos cilindros centrais que apoiam os potes de suspensão. E é desta forma que surge este segundo modelo.

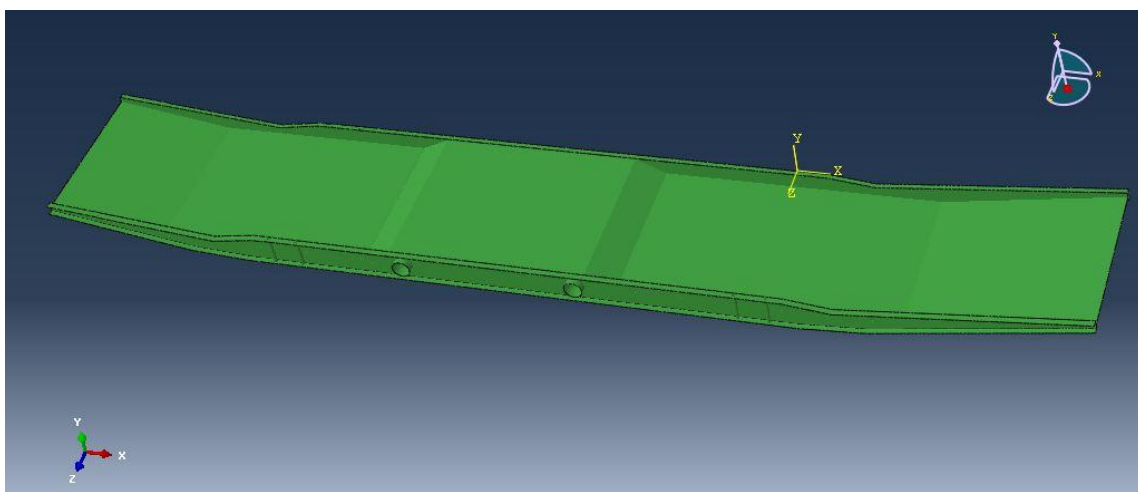


Figura 24- Modelo utilizado para a aplicação dos materiais compósitos (abaqus).

Apesar de o objetivo do trabalho ir apenas ao encontro da implementação de materiais compósitos num chassi de automóvel, usando os dois modelos esperam-se resultados mais abrangentes, de maneira a entender, também, qual o *design* do chassi mais apropriado e porquê.

Como uma alternativa, optou-se por testar um modelo híbrido (apresentado na Figura 25), ou seja, são mantidas as longarinas em material metálico e o resto da estrutura é mantida em materiais compósitos.

Nas estruturas híbridas é importante ter cuidado com:

- 1) A escolha inadequada da liga metálica para que esta não corroa nas proximidades dos materiais compósitos.
- 2) Ter cuidado para que o material que sela a corrosão das peças metálicas não se danifique na montagem (Ashby e Cebon 1993).

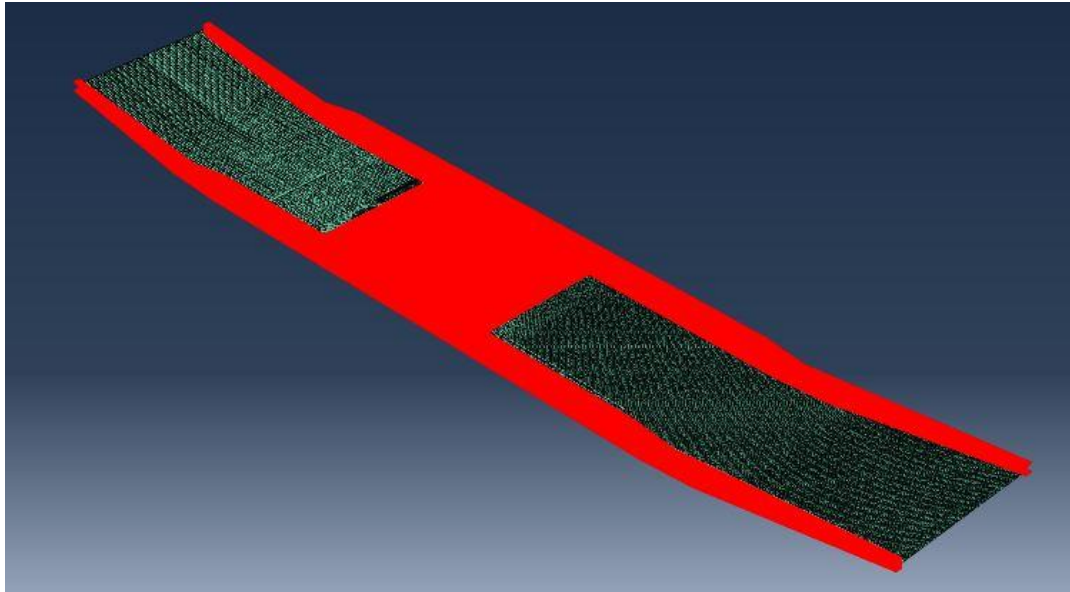


Figura 25- Modelo híbrido (abaqus).

Primeiramente foi feita uma simulação do chassi original, para conseguir determinar os seus pontos críticos. De seguida, foram testados vários materiais compósitos no segundo modelo, de maneira a perceber, qual tornaria possível a sua construção. Aqui para cada material foram testadas várias espessuras, bem como diferentes orientações das fibras. Após obtidos os resultados, voltou-se ao primeiro modelo para fazer a comparação dos diferentes valores máximos de tensões verificados nos diferentes modelos. Depois disto, serão ainda apresentados os resultados obtidos no segundo modelo quando aplicado apenas alumínio e em seguida, alumínio, com o compósito que apresentou menores tensões, e ainda, testar a junção de alumínio com carbono (à semelhança de um exemplo do estado da arte) e desta forma, dar origem a um modelo híbrido.

Em suma, foram apresentados os aspetos importantes a ter em atenção na produção de compósitos quando relacionados com o *design* dos componentes. A referência às ligações em materiais compósitos deve-se aos elementos roscados que servem de apoio ao chassi. Já que, uma vez alterado o material do chassi os apoios serão mantidos e isso é um facto que precisa de ser tido em consideração.

No capítulo seguinte são descritos os casos que são relevantes para o estudo de um chassi.

6 Casos de Estudo

Como o chassi pertence à categoria dos componentes de segurança, o seu *design* deve ter em conta a durabilidade de um componente que nunca deve falhar e existem vários tipos de considerações. Estas estão retratadas na Figura 26. E por isso, devem ser levadas a cabo todas as considerações possíveis de cargas de serviço (Hägele e Sonsino 2012).

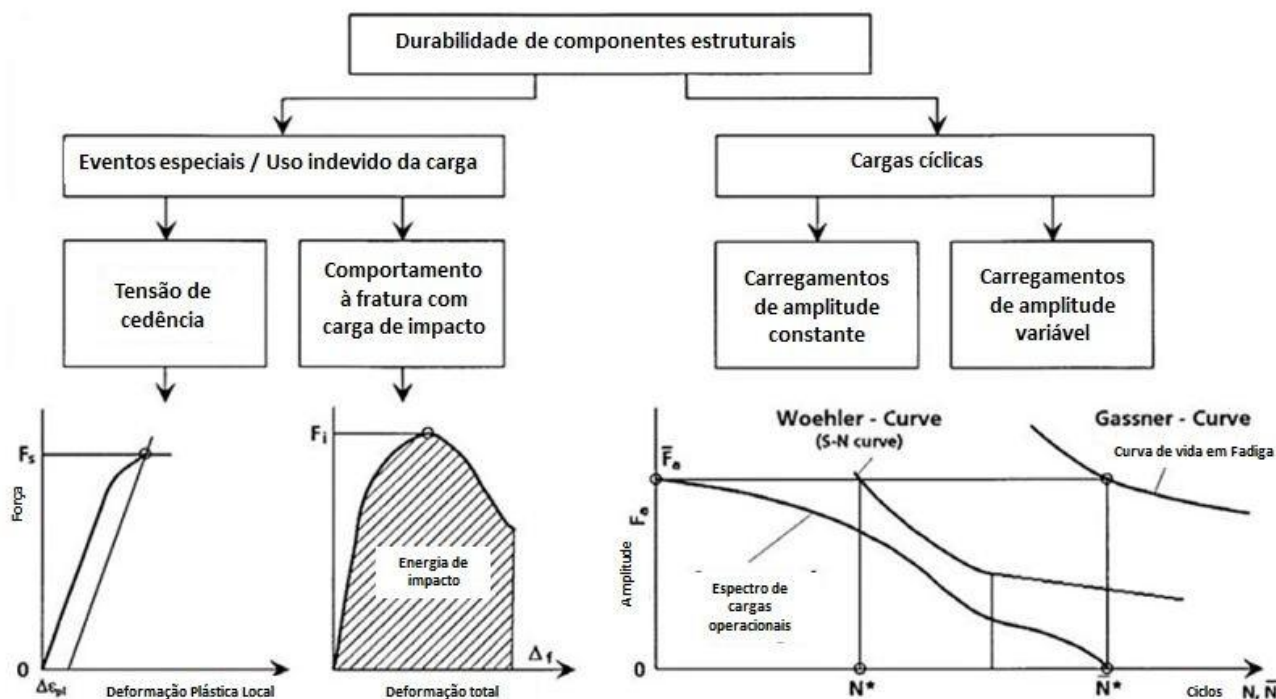


Figura 26- Durabilidade de componentes estruturais, adaptado de (Hägele e Sonsino 2012).

O chassi tem de suportar todos os componentes e todas as cargas. Estas cargas incluem o peso de cada componente e as forças que se manifestam durante a aceleração e desaceleração, ou curvas a que o veículo possa estar sujeito nas suas trajetórias. Os componentes que normalmente estão ligados ao chassi são: o motor, o sistema de direção, o sistema de travagem, o sistema de amortecimento, bem como os bancos. Portanto, o chassi é considerado o elemento mais importante do veículo, uma vez que detém todas as peças e componentes em conjunto.

Em caso de acidente, o chassi tem de ser capaz de proteger o ocupante de uma lesão. O impacto frontal é absorvido pela parte dianteira do chassi. Paralelamente com os aspetos de segurança o chassi, deve também ser projetado pensando na eficiência do combustível que o veículo irá utilizar (Mat e Ghani 2012).

6.1. Parâmetros a considerar

Para o desenvolvimento do chassi em materiais compósitos é necessário ter a percepção de que nestes materiais a rotura se dará de maneira diferente das convencionais (quando se trata de metais) e por isso, é de elevada importância ter noção do que poderá acontecer, para da melhor forma o evitar. Assim sendo, há critérios específicos para a análise da rotura em materiais compósitos. Esta rotura pode acontecer devido a:

- 1) Rotura da matriz do compósito;
- 2) Rotura das fibras;
- 3) Não coesão entre a matriz e a estrutura das fibras;
- 4) Delaminagem.

Os critérios de rotura mais utilizados em materiais compósitos, são baseados na resistência dos materiais, que de uma forma genérica são os mais utilizados pelos programas de simulação (Tsai 2008).

6.1.1 – Rigidez de torção

A rigidez de torção é vista como uma das mais importantes características da construção do chassi. As cargas de torção tende a girar uma das extremidade do chassi em relação à outra extremidade, como se vê na Figura 27 e afetam negativamente o manuseamento do carro.

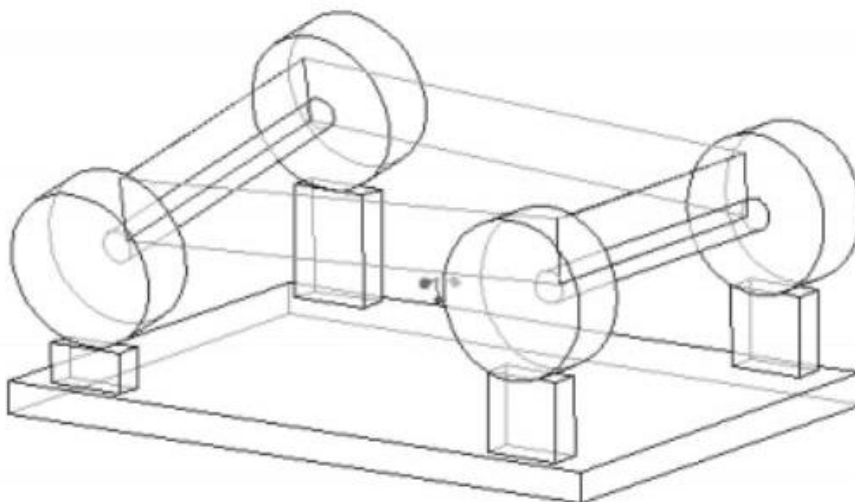


Figura 27- Efeito da torção do chassi (Wass 2013).

Cargas de torção surgem em diferentes situações. O caso mais comum é quando uma roda atinge um ponto mais alto (uma lombada) enquanto as outras três permanecem na posição vertical inicial, isto porque é aplicado um binário ao chassi (Wass 2013).

Depois de aplicadas estas condições no *abaqus* será possível calcular a rigidez do chassi, para isso recorre-se à Figura 28 que melhor o ilustra.

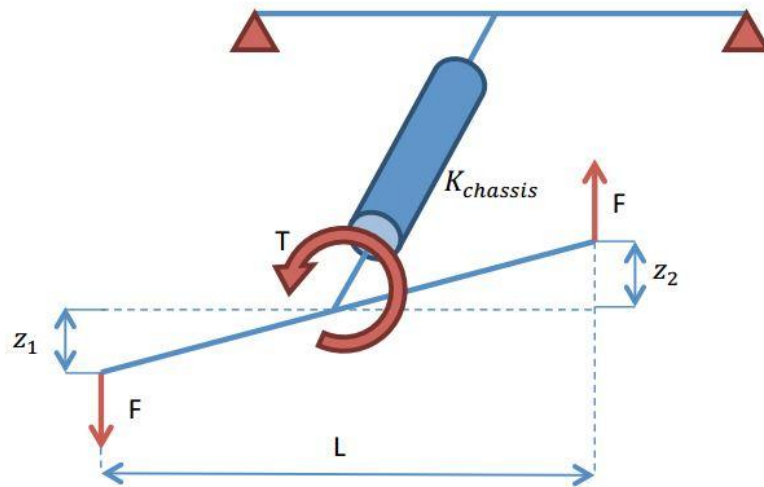


Figura 28- Parâmetros a considerar para o cálculo da rigidez do chassi (Wass 2013).

A partir dos resultados obtidos, será possível calcular a rigidez do chassi, recorrendo à formulação (Wass 2013) que se apresenta em baixo.

$$K_{ch} = \frac{\text{Binário (Nm)}}{\text{Ângulo de torção (°)}} = \frac{FL}{\tan^{-1}\left(\frac{\Delta z_1 + \Delta z_2}{2L}\right)}$$

6.1.2 – Flexão

A flexão vertical (ver Figura 29) é resultado da transferência de carga longitudinal que ocorre durante a mudança repentina de velocidade (Wass 2013).

Ao projetar um chassi, a flexão não é uma prioridade a considerar, até porque está demonstrado que um chassi com uma boa resistência à torção tem a rigidez necessária para não fletir.

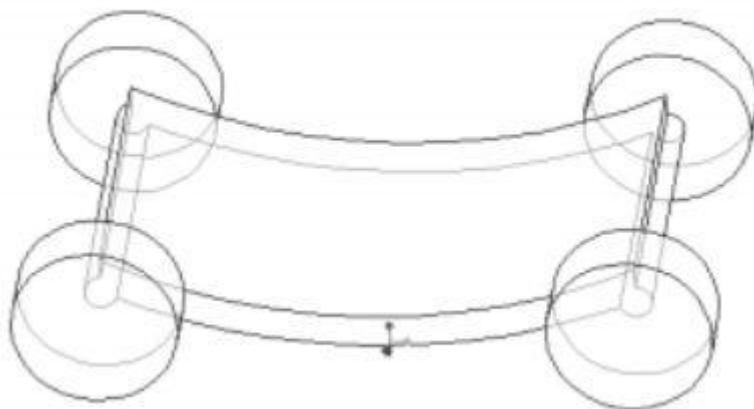


Figura 29- Efeito de flexão do chassi (Wass 2013).

Pode ocorrer também, flexão lateral (Figura 30), esta é tipicamente o resultado das forças centrífugas que ocorrem nas curvas. Estas forças laterais tendem a modificar a direção pretendida do carro, essas curvas dão origem a um binário que transfere uma parte da carga da parte interior para a parte exterior do veículo (Wass 2013).

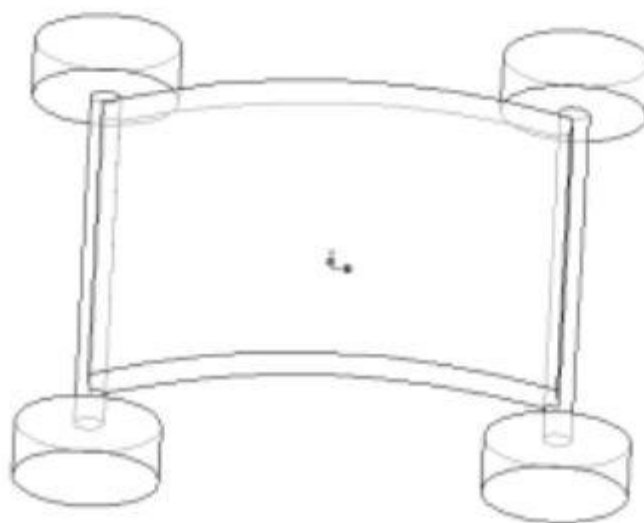


Figura 30- Representação da flexão lateral no chassi (Wass 2013).

O deslocamento do centro de gravidade nas curvas também pode ser considerado no projeto. É importante certificar que o componente onde estão os fluídos voláteis esteja o mais baixo possível, para diminuir a transferência de carga lateral e também diminuir o centro de gravidade do carro.

Numa escala global de *design* devem ser consideradas determinantes a alta resistência à torção em comparação com o módulo de *Young* dos materiais disponíveis. Apesar disso, as maiores concentrações de tensões ocorrem na suspensão e nos apoios do motor e isto vai ser verificado na caracterização do ponto crítico (no capítulo 9).

6.1.3 – Ligação aparafusadas entre elementos

Estas ligações têm como vantagens o facto de permitirem a montagem rápida e repetida dos componentes; uma fácil inspeção visual para a deteção de dano ou desgaste do componente, e um bom comportamento quando solicitadas à tração. Porém, este tipo de ligações, como interrompe a continuidade das fibras, reduzem a resistência do componente e dos seus substratos; o furo induz a concentração de tensões. Assim, a utilização de ligações aparafusadas vai ser estudada, também, no que toca à definição dos pontos críticos no modelo em materiais compósitos. A resistência mecânica de uma junta pode ser aumentada quando se consegue reduzir a concentração de tensões e se usam materiais mais tenazes na zona do furo.

6.2. Modelo Estático

O objetivo do modelo é quantificar as características de *design* de forma a garantir a rigidez torcional necessária. É preciso garantir um compromisso entre a elevada rigidez e a diminuição de peso que se pressupõe à utilização dos materiais compósitos. Pretende-se que seja possível demonstrar que a elevada rigidez não seja necessariamente sinónimo de maior peso, do que o veículo na sua forma original.

6.3. Definição do ponto crítico

Olhando para o modelo original, espera-se que os pontos críticos rondem os apoios do chassi, que são ligações aparafusadas ao eixo das rodas. Este facto vai ser de seguida analisado, através das simulações feitas no *abaqus*, quer comparado com os resultados obtidos analiticamente. Esta definição do ponto crítico é relevante, já que aquando da passagem para materiais compósitos, será também um ponto sensível da geometria e assim poderá ser tida uma atenção redobrada, para os resultados obtidos nessa zona. Este ponto será aquele, a que à partida, sendo mais sensível, poderá começar uma fenda, ou levar mesmo à rotura da plataforma.

Definidos os casos que se irão abordar e antes de se entrar nos métodos numéricos e nas simulações efetuadas, vai ser feita uma introdução ao fabrico do molde que será necessário para o fabrico do chassi em ambiente industrial.

7 Projeto de fabrico de moldes

Os moldes podem ser fabricados em metal, geralmente alumínio ou aço, ou então no próprio compósito. Para os processos de compressão a quente, autoclave e RTM com elevadas pressões, utilizam-se os moldes metálicos. Os moldes em fibra são muito utilizados nos processos de infusão de resina assistida por vácuo e RTM a baixas pressões chamado RTM Light. Os moldes em pré-impregnado de fibra de carbono são utilizados na aeronáutica e tem um custo muito elevado.

Atualmente, utilizam-se muitos materiais de elevada densidade maquináveis para obter diretamente o molde e evitar a fase do modelo para obter o molde.

Os moldes devem considerar o tipo de tecnologia de produção a utilizar para produzir a peça. De modo geral, é necessário ter ângulos de saída para desmoldar a peça, pequenos raios de curvatura para a fibra se adaptar ao molde, coeficientes de expansão térmica molde/peça e temperatura de processamento.

7.1. O chassi

No projeto do chassi devemos ter em consideração vários fatores, tais como:

- a) Requisitos do chassi (geometria, leveza, resistência mecânica, montagem com outros componentes, fatores ambientais e ecológicos, número de peças a produzir, custos de produção e preço no mercado);
- b) Desenhos de detalhe do chassi e de conjunto;
- c) Pré-seleção de materiais como fibras e resinas/termoplásticos;
- d) Seleção da tecnologia de produção;
- e) Desenho e fabrico de moldes (considerar ângulos de saída, raios de curvatura das fibras, entre outros);
- f) Produção de protótipo demonstrador;
- g) Otimização e desenvolvimento final.

Chegada a esta fase do projeto, foi necessário pensar em como desenhar o molde, e aí surgiram alguns problemas, sendo a longarina um perfil em U, para fazer um molde inteiriço, uma das “abas” precisa de desaparecer, para que seja possível desmoldar o componente. Para além disso, é necessário ter em atenção que as fibras não permitem ângulos de 90° e por isso, cada ângulo reto deve ser substituído por um raio de 5°. Para além disso, são necessários

ângulos de saída para a peça, desta forma as superfícies devem ter dois graus como ângulo de saída.

De entre os processos de fabrico que anteriormente se refiram neste documento, os mais apropriados para produzir o chassi são RTM (abordado na secção 3.3.2 deste documento), SMC (abordado na secção 3.3.3) com matriz termoplástica e tecidos de fibra GMT. O processo de infusão de resina pode ser utilizado para produzir o protótipo demonstrador e analisar as dificuldades e problemas antes de fabricar um molde final.

Na fase seguinte são apresentados os métodos que serão utilizados para validação e previsão de algumas considerações que serão importantes quando analisados os resultados das simulações.

8 Métodos Numéricos

Existem alguns métodos que podem ser usados para a análise de estruturas. Entre eles, vão ser destacados o método dos elementos finitos. Mas também se pode fazer referência, por exemplo, ao método das diferenças finitas.

Além disso, neste documento vai ser feita uma introdução e apresentação de um método analítico de forma a validar e prever alguns resultados das simulações.

8.1. Solução analítica

A análise analítica de fenômenos físicos e de processos é chamada de modelo matemático. Os modelos matemáticos de um processo são desenvolvidos com base nas suas características específicas e que são frequentemente definidas por equações diferenciais e/ou integrais complexas em domínios geométricos geralmente complicados. Por isso, até à generalização do uso do computador, os processos a estudar eram drasticamente simplificados de modo a que as equações que os regiam pudessem ser resolvidas analiticamente (Santos 2013).

Tratando-se de uma estrutura hiperestática e por se saber que a sua análise analítica seria demorada, recorreu-se à aplicação *force effect* para obter essa mesma análise de uma forma mais expedita.

- Modelo original

Força aplicada de 0,023 N.

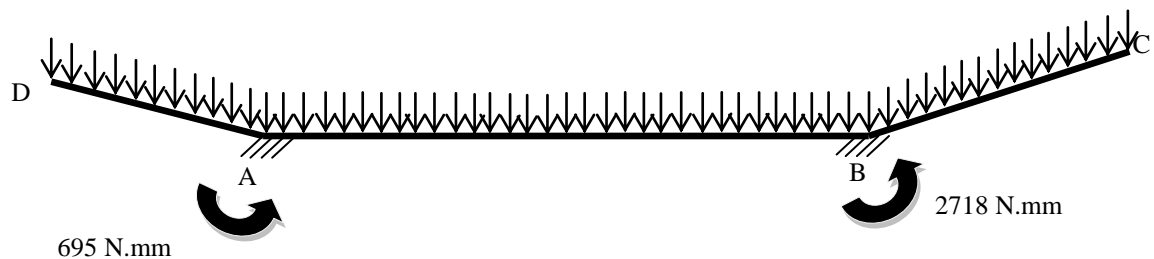


Figura 31- Representação estática do modelo original

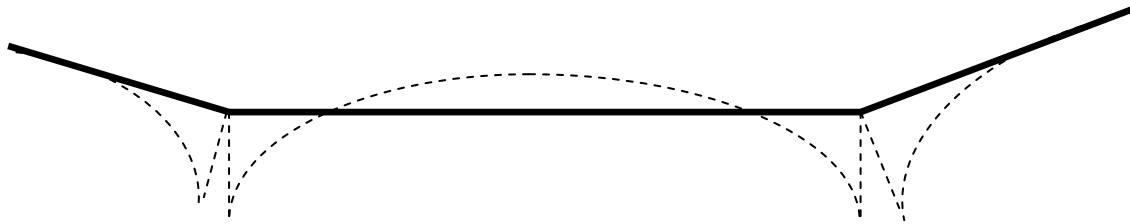


Figura 32- Representação dos momentos fletores do modelo original

Pela Figura 31 entende-se que o ponto crítico da estrutura será o apoio traseiro do chassi. Isto será verificado, também, mais à frente nas simulações feitas. Para além disso, apresenta-se na Figura 32 o diagrama de momentos fletores referente ao carregamento a que o chassi está sujeito.

- Segundo modelo

Força aplicada de 0,0067 N

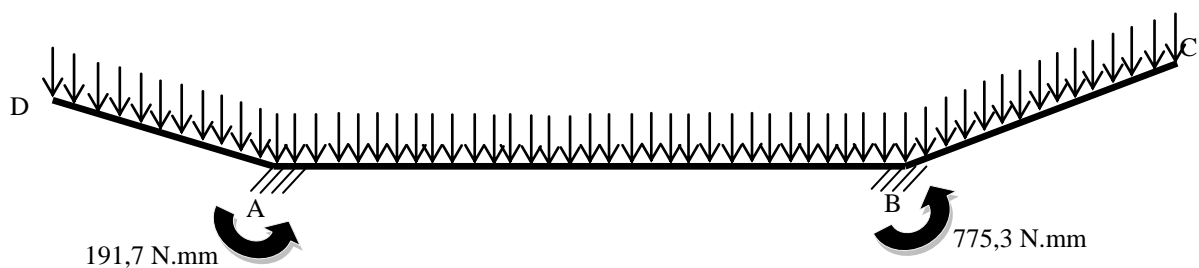


Figura 33- Representação estática do segundo modelo do chassi

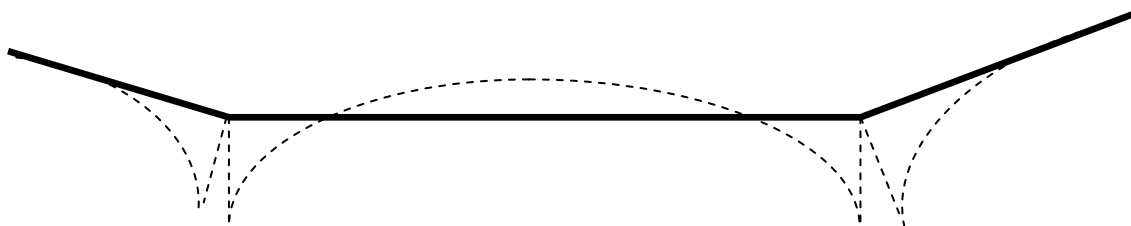


Figura 34- Representação dos momentos fletores no segundo modelo

Como anteriormente, esta análise estática permite perceber desde já qual será o ponto crítico da estrutura. Como o chassi não é simétrico, e a sua parte traseira é mais comprida, no apoio B, surgirá um maior momento associado (

Figura 33) e por isso, esse é o ponto crítico do componente. É apresentado, também o diagrama de momentos flettores da estrutura (Figura 34).

Ainda assim, para este tipo de análise, há parâmetros que são simplificados. O chassi realmente tem quatro apoios roscados. Este *software* utilizado só permite impor dois apoios. Torna a análise bem mais expedita e ajuda o utilizador de uma forma bastante intuitiva e rápida, as tensões normais sofridas na estrutura, bem como os momentos flettores a que a mesma está sujeita. Ainda assim, este género de análises nestes trabalhos é um complemento a todas as simulações efetuadas posteriormente.

8.2. Solução numérica

A simulação numérica pode ser definida como a utilização de um método numérico e um computador para resolver um modelo matemático. A utilização da simulação numérica, através do uso, por exemplo, do MEF, não constitui um fim em si mesmo, representa antes um auxiliar importante na análise e desenvolvimento de um processo. Existem diversas razões para a grande utilização de métodos numéricos. Uma das principais diz respeito ao facto de a maioria das aplicações práticas envolver domínios complicados, cargas e diversas não linearidades que tornam proibitivo o desenvolvimento de soluções analíticas. Por isso, a única alternativa é fazer uso de métodos numéricos encontrando soluções aproximadas.

Existem vários métodos de solução numérica de modelos matemáticos associados à simulação de processos tecnológicos. Neste trabalho, destaca-se o método dos elementos finitos. Esta escolha não é arbitrária, já que o *software* utiliza este método. O método de elementos finitos é usado como um método geral de aproximação para soluções numéricas de problemas físicos descritos por equações de campo num meio contínuo. Este método tem sido colocado pelos matemáticos num esqueleto elegante, rigoroso e formal, com condições matemáticas precisas de existência e critérios de convergência (Santos 2013). De uma forma geral, o presente método consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original (Lotti et al. 2006).

Projetar usando a análise de elementos finitos é importante porque os dados da simulação são úteis para a melhoria do *design* e leva à melhoria da relação custo-eficácia, fomentando a competitividade no desenvolvimento de produtos cada vez mais com melhores qualidades e atributos (Nor et al. 2012).

A análise de tensões é importante no estudo de fadiga e na previsão de vida das peças, permitindo determinar o ponto crítico onde se encontra a maior concentração de tensões (Nor et al. 2012).



Figura 35- Metodologia de análise por elementos finitos, adaptado de (Nor et al. 2012).

Pela técnica de elementos finitos consegue-se aferir com certas solicitações quais os pontos críticos, bem como estudar, o campo de tensões e deformações ao longo da estrutura, e averiguar qual a sua resistência em flexão e rigidez, de modo a ser possível dimensionar corretamente os elementos estruturais do veículo.

Mais que a utilização de elementos finitos, a recorrência a simulações deve-se ao facto de conseguirmos, de alguma forma, prever o que poderá ocorrer, quando sabemos a que género de solicitações está sujeito determinado componente. Desta forma, é possível modificar projetos, de maneira económica e expedita, já que esta alteração é feita ainda na fase de projeto e não mais tardiamente, aquando da produção. A Figura 35 pretende demonstrar como este tipo de práticas são um bom método de análise e previsão.

Uma simulação é geralmente implementada num *software* que simula a função ou funções interativas. Não é, provavelmente a maneira ideal de comunicar as principais características de determinados produtos, mas em alguns casos, pode ser muito eficaz (Ulrich e Eppinger 1995).

Neste capítulo será apenas descrito, o que foi necessário definir e atribuir no *software* de forma a serem conseguidas as simulações que também se darão a conhecer. Desde já, se deixa claro que neste trabalho, são usados apenas elementos de 3 e 4 nós. Estes elementos bidimensionais passam a ser descritos por equações diferenciais de derivadas parciais. O elemento mais simples é o de 3 nós e tem como uma grande vantagem o facto de que qualquer

espaço bidimensional pode ser facilmente dividido em triângulos. Os elementos retangulares de 4 nós por vezes, devido a distorções têm de ser subdivididos em elementos triangulares de maneira a diminuir a deformação dos elementos e aumentar dessa forma a qualidade da malha.

Aqui pretende-se demonstrar as fases por que normalmente é preciso passar um problema deste género: a) pré processamento, onde é definida a geometria do problema; b) definição de elementos a utilizar que formaram a posterior malha; c) definição do material a utilizar; d) Definição das condições de fronteira e cargas a aplicar; e) pós processamento: resultados obtidos que podem ser lidos de diferentes modos (Santos 2013).

Uma das principais vantagens da utilização deste género de *software* é a possibilidade bastante intuitiva de alterar qualquer variável relacionada com a simulação, facilitando a análise dos resultados, proporcionando grandes benefícios em pesquisas científicas, por exemplo. Deve-se ter em mente, porém, que apesar de todas estas vantagens, as precisões dos resultados obtidos também têm limites de tolerâncias, ou seja, os resultados obtidos também têm alguns erros que se poderão dever a i) simplificações para a adoção de um determinado modelo matemático; ii) a divisão de estruturas complexas em várias formas geométricas, levando à perda de alguns detalhes. Trata-se de um método muito próximo de prever o que vai acontecer, não esperando, apesar disso que os resultados aquando da realidade sejam iguais. Serão decerto diferentes. Desta forma, este tipo de soluções de problemas é para ter a noção de como determinado componente se irá comportar, não esquecendo que é necessário ter em atenção coeficientes de segurança e testes reais, de maneira a que nada falhe.

As análises feitas em *abaqus* serão de carácter estático, onde são consideradas as forças a que a estrutura está sujeita, nomeadamente o peso de todos os componentes do carro que no chassi são acoplados e/ou suportados, bem como, o peso, dos 5 passageiros que neste veículo têm lugar. Os modelos são trabalhados como casca, já que originalmente o chassi é composto por diversos perfis ligados por elementos roscados ou soldados. Considerou-se que desta forma se teria uma boa aproximação, já que a espessura média dos perfis e de toda a estrutura do chassi ronda os dois milímetros.

Apesar de neste documento as análises feitas, envolverem essencialmente a aplicação de forças, o *software* permite fazer muitas mais coisas. De entre elas é de referir, que em determinados casos, poderiam ter-se aplicados deslocamentos, em vez de forças para obter os resultados pretendidos.

8.3. Malha

Para o modelo original, optou-se por utilizar apenas elementos de 3 nós, como se vê na Figura 36. Usando a malha triangular, foram obtidos, 263 779 elementos e 132 633 nós. No caso do segundo modelo, usado para materiais compósitos e no modelo híbrido são usados elementos de 3 e 4 nós, este modelo na totalidade tem 144 317 nós e 144 132 elementos.

Neste trabalho não será feito o estudo da convergência de resultados com a alteração da malha, já que para malhar este complexo componente foi necessário recorrer ao *software* ANSA (disponível apenas no IDMEC), pois o *abaqus* não permitia a criação de uma malha estruturada para este componente, devido a erros que existiam na geometria pela tentativa de exportar o componente do *solidworks* para o *abaqus*. Desta forma, foi necessário, do *solidworks* passar para o ANSA, definir a malha e colocar a geometria no *abaqus*. Já neste, havia uma série de erros na geometria (superfícies que não estavam ligadas, elementos

distorcidos) que foi necessário retificar. Foi uma operação minuciosa onde foi perdido muito tempo.

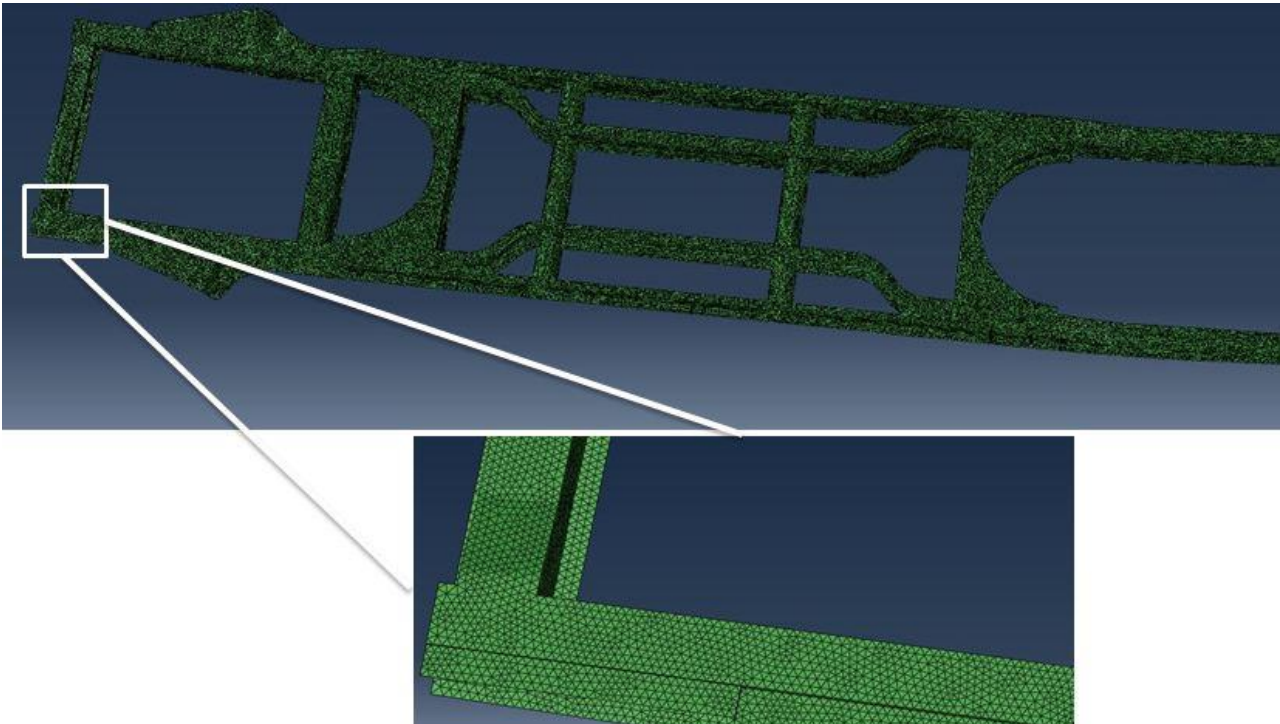


Figura 36- Malha triangular utilizada no modelo original (*abaqus*).

8.4. Condições de Fronteira

Em termos de condições de fronteira, os apoios, neste carro são apoios roscados, logo não poderão sofrer deslocamentos e rotações e por isso foram considerados encastramentos. Ou seja, o chassi tem assim, 8 encastramentos. A Figura 37 é apenas ilustrativa para se perceber a localização dos encastramentos. Apesar de ser representado o modelo original, as mesmas condições de fronteira serão aplicadas no modelo para materiais compósitos e no modelo híbrido.

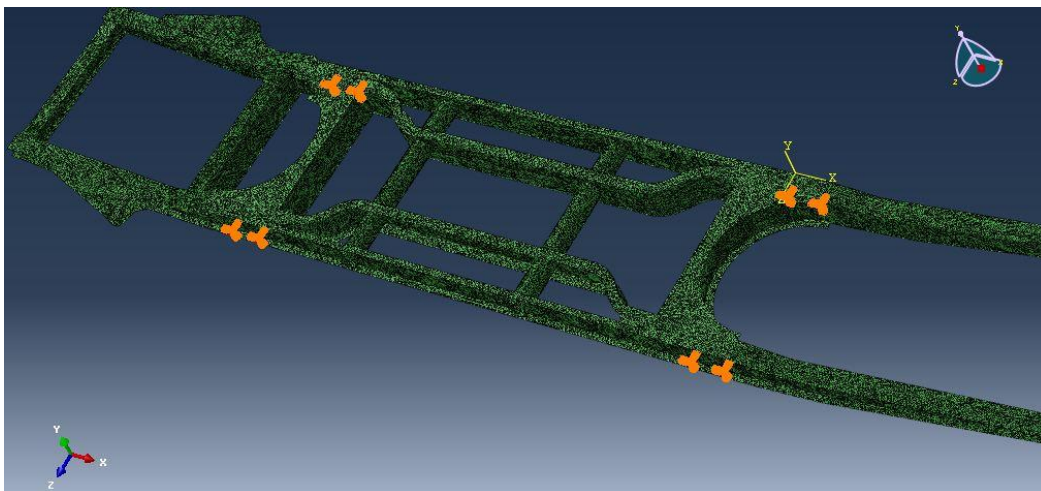


Figura 37- Condições de fronteira aplicadas (*abaqus*).

8.5. Forças aplicadas no modelo original

Como forças a aplicar, inicialmente considerou-se apenas o peso a que o chassi poderá estar sujeito, ou seja:

• Todo o veículo a suportar $\cong 500$ Kg;	4 900 N
• 5 Pessoas $\cong 600$ Kg (120 Kg cada uma);	5 880 N
• Bagagem $\cong 200$ Kg;	1 960 N
<hr/>	
Total $\cong 1300$ Kg	12 740 N

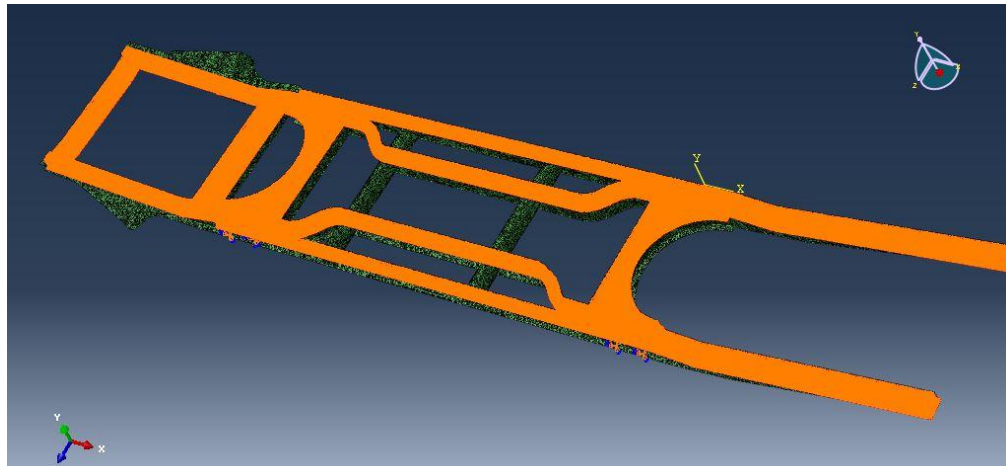


Figura 38- Carga distribuída aplicada no modelo original (*abaqus*).

Ou seja, a força a aplicar no modelo original serão 12 740 newtons (ver Figura 38). Sendo a área superficial igual a $555\,224\text{ mm}^2$. A força distribuída a aplicar será de $0,023\text{ N/mm}^2$. A Figura 39 mostra a área considerada.

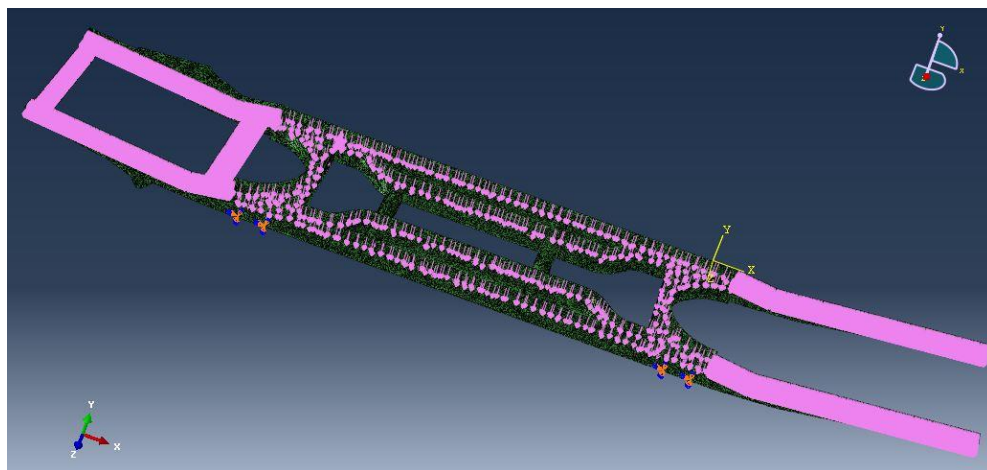


Figura 39- Área superficial total no modelo original (*abaqus*).

8.6. Forças aplicadas no modelo compósito

Como a estrutura foi alterada para simular os materiais compósitos, dado que as curvas e os perfis de que a estrutura original tem seria muito difíceis de reproduzir em materiais compósitos, a área superficial a aplicar os 12 740 newtons, é superior à da estrutura original.

Desta forma, no segundo modelo apresentado, este tem uma área superficial de 2 082 440 mm², que para dar origem a uma força igual à descrita anteriormente, terá de ser aplicada uma carga distribuída de 0,0061 N/ mm², como se verifica na Figura 40.

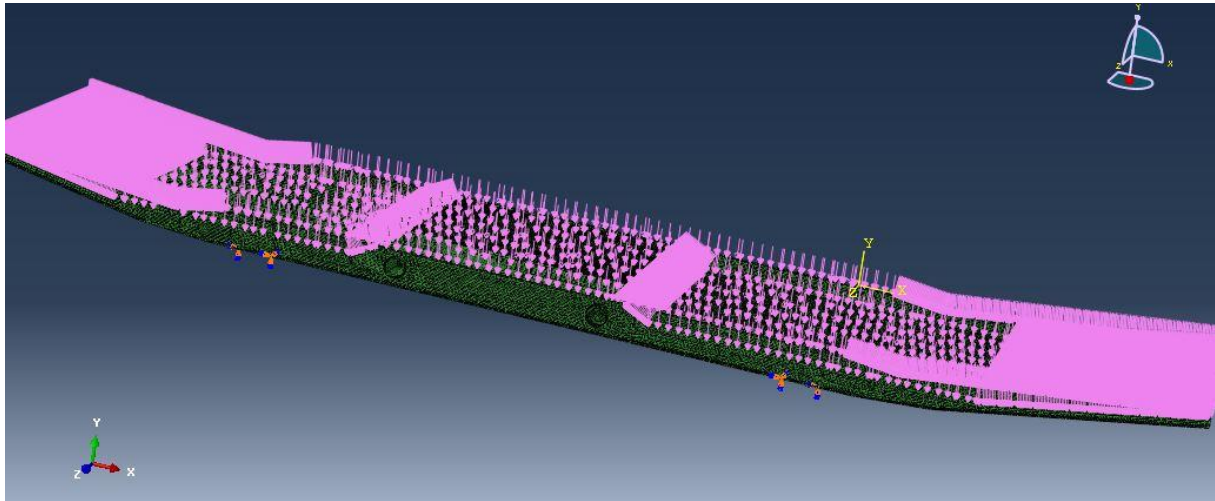


Figura 40- Forças aplicadas no segundo modelo para materiais compósitos (*abaqus*).

8.7. Propriedades dos materiais utilizados

Para simular em *abaqus* é necessário definir o material, este procedimento é da responsabilidade do utilizador. Este insere as propriedades e valores que definem o material. Por esta razão, são aqui apresentados os valores introduzidos para os materiais mais relevantes neste estudo. As propriedades dos restantes materiais estão descritas no ANEXO A. Foi feita esta divisão de texto porque foi considerado, que toda a informação ao longo do texto ficaria muito confusa.

8.7.1. Aço

O aço é o material usado no componente original, por isso foi esta a primeira simulação efetuada, de forma a perceber quais as tensões induzidas no chassi original. As suas propriedades estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8- Propriedades do Aço.

Densidade		$7,8e^{-9}$
Elasticidade	Módulo de <i>Young</i>	$2,1e^5$ MPa
	Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.3
Tensão de cedência		235 MPa

8.7.2. Alumínio

Pensou-se utilizar alumínio, pela sua baixa densidade e perceber até que ponto seria vantajoso, ou não a sua utilização no chassi. E por isso, são apresentadas as suas propriedades na Tabela 9 que se segue.

Tabela 9- Propriedades do alumínio.

Densidade		$2,7e^{-9}$
Elasticidade	Módulo de <i>Young</i>	$70e^3$ MPa
	Coefficiente de <i>Poisson</i>	0,3
Tensão de cedência		120 MPa

O aço e o alumínio foram os únicos materiais metálicos utilizados. Depois destes foram usados materiais compósitos. Inicialmente foram testados os materiais que se apresentaram de seguida, pode-se fazer referência ao carbono epóxico, às fibras de vidro epóxico, entre outros.

Para além dos resultados retirados da aplicação direta ao segundo modelo destes materiais (utilizando diferentes espessuras), foram seleccionados os melhores resultados e aplicados ao primeiro modelo.

8.7.3. Carbono (T800H) epóxico (3900-2) e Carbono (IM7) epóxico (977-2)

Este foi o primeiro material compósito a ser testado no *abaqus*, com o segundo modelo, a Tabela 10 pretende mostrar os valores que foram introduzidos no *software* para o Carbono (T800H) epóxico (3900-2).

Tabela 10- Propriedades do carbono (T800H) epóxico (3900-2) e carbono (IM7) epóxico (977-2) (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

	<i>C (T800H) epóxico</i>	<i>C (IM7) epóxico</i>
$V_f (\%)$	0,65	0,65
E_1 (MPa)	$162e^3$	$168e^3$
E_2 (MPa)	$9,0e^3$	$7,6e^3$
G_{12} (MPa)	$6,2e^3$	$5,5e^3$
G_{23}^* (MPa)	$3,77e^3$	$2,92e^3$
ν_{12}	0,28	0.30
σ_{uc1} (MPa)	1550	1500
σ_{uc2} (MPa)	165	246
σ_{uf1} (MPa)	2840	2818
σ_{uf2} (MPa)	52	40
τ_{12} (MPa)	58	109

Foram precisos introduzir valores para G_{13} , que segundo (Moura, Morais, e Magalhães 2011), assumindo isotropia transversal toma o mesmo valor de G_{12} . Foi segundo o mesmo autor que se retiraram as propriedades do material, bem como se calculou G_{23} , através de:

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})}$$

8.7.4. Carbono (T300) epóxico (934) e Carbono (AS4) epóxico (3501-6)

Tabela 11- Propriedades do carbono (T300) epóxico (934) e carbono (AS4) epóxico (3501-6) (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

	<i>C (T300) epóxico</i>	<i>C (AS4) epóxico</i>
$V_f(\%)$	0.60	0,63
E_1 (MPa)	$138e^3$	$143e^3$
E_2 (MPa)	$9,65e^3$	$10,3e^3$
G_{12} (MPa)	$4,55e^3$	$7,2e^3$
G_{23}^* (MPa)	$3,71e^3$	$4,05e^3$
ν_{12}	0.30	0,27
σ_{uc1} (MPa)	1280	1440
σ_{uc2} (MPa)	168	228
σ_{uf1} (MPa)	1314	2280
σ_{uf2} (MPa)	43	57
τ_{12} (MPa)	48	71

8.7.5. Carbono (AS4) PEEK (APC2) e Fibra de vidro epóxico

Tabela 12- Propriedades do carbono (AS4) PEEK (APC2) e fibra de vidro epóxico (Moura, Morais, e Magalhães 2011).

	<i>C (AS4) PEEK</i>	<i>Fibra de vidro epóxico</i>
$V_f(\%)$	0,66	$45e^3$
E_1 (MPa)	$134e^3$	$12e^3$
E_2 (MPa)	$8,9e^3$	$4,5e^3$
G_{12} (MPa)	$5,1e^3$	$4,6e^3$
G_{23}^* (MPa)	$3,5e^3$	0.3
ν_{12}	0.28	600
σ_{uc1} (MPa)	1100	141
σ_{uc2} (MPa)	200	1250
σ_{uf1} (MPa)	2130	36
σ_{uf2} (MPa)	80	63
τ_{12} (MPa)	160	-

8.7.6. Fibra de KEVLAR® epóxico e Fibra de carbono epóxico

Tabela 13- Propriedades da fibra de KEVLAR® epóxico e fibra de carbono epóxico (Gay, Hoa, e Tsai 2002).

	<i>KEVLAR® epóxico</i>	<i>Carbono epóxico</i>
E_1 (MPa)	$85e^3$	$134e^3$
E_2 (MPa)	$5,6e^3$	$7e^3$
G_{12} (MPa)	$2,1e^3$	$4,2e^3$
G_{23}^* (MPa)	$2,1e^3$	$2,8e^3$
ν_{12}	0,34	0,25
σ_{uc1} (MPa)	280	1130
σ_{uc2} (MPa)	141	141
σ_{uf1} (MPa)	1410	1270
σ_{uf2} (MPa)	28	42
τ_{12} (MPa)	45	63

8.7.7. Sanduiche: Fibra de vidro E e espuma Strucell P80

Tabela 14- Propriedades da fibra de vidro E e Strucell P80

	<i>Fibra de vidro E</i>	<i>Strucell P80</i>
E_1 (MPa)	$38e^3$	$78,3e^3$
E_2 (MPa)	$8,5e^3$	-
G_{12} (MPa)	$3,5e^3$	$27e^3$
G_{23}^* (MPa)	$3,13e^3$	-
ν_{12}	0,3	0,45
σ_{uc1} (MPa)	500	1,4
σ_{uc2} (MPa)	100	-
σ_{uf1} (MPa)	700	2,5
σ_{uf2} (MPa)	30	-
τ_{12} (MPa)	30	1,15

Para o teste de uma estrutura sanduiche optou-se por utilizar fibra de vidro E e uma resina isofetálica de poliéster não saturado. A opção foi simplesmente por razões económicas,

aliado ao facto de se encontrar facilmente no mercado. O núcleo da estrutura sanduiche em espuma de PVC denominada *Strucell* P80 porque é a mais barata.

Em suma, estão apresentadas as características e propriedades inseridas no *abaqus*, no que concerne aos materiais como à estrutura do chassi.

Definidos estes casos, serão de seguida apresentados os resultados obtidos. Como foi dito anteriormente, todos os materiais apresentados vão ser testados. Os resultados serão apresentados inicialmente no segundo modelo por diversos motivos:

- 1) É apresentado como o modelo a aplicar a materiais compósitos;
- 2) Serve para rastrear os materiais de maneira, a não serem todos testados posteriormente no modelo original.
- 3) Já se espera que a rigidez deste modelo seja superior à do modelo original.

9 Resultados

Depois de definidas as condições de fronteira, e as cargas a aplicar, que foram explicadas anteriormente, foi possível perceber, fazendo uma estimativa da carga que o chassi suporta, qual seria o seu ponto crítico, tendo em atenção sempre, o valor de referência, sendo este a tensão de cedência do aço de 235 MPa.

Considerando que o chassi suporta com um peso total de 1 300 quilogramas, ou seja, 12 740 newtons.

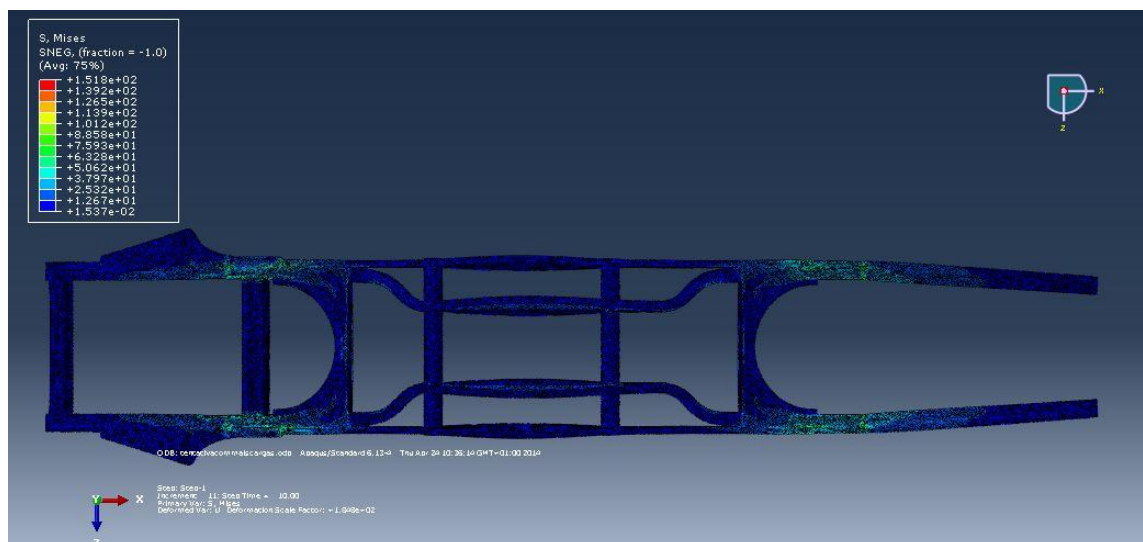


Figura 41- Deformação do chassi em aço (abaqus).

É assim possível identificar o ponto crítico, onde a tensão máxima é de 151,8 MPa. A Figura 41 mostra a deformação do chassi e na Figura 42 pode ver-se em pormenor o ponto crítico, bem como o valor da deformação no mesmo.

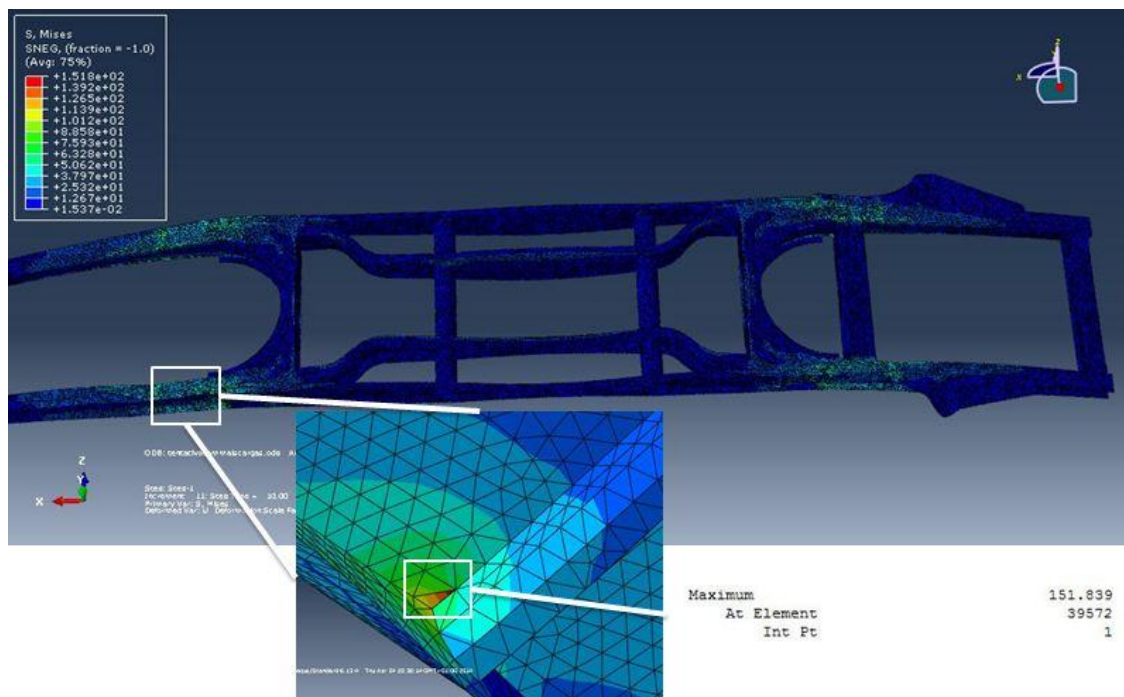


Figura 42- Ponto crítico do chassi em aço (*abaqus*).

Definido o ponto crítico, as primeiras simulações foram feitas no segundo modelo, isto porque, considera-se que este modelo será o mais fácil para produzir em materiais compósitos. Onde são diminuídas as formas complexas e se tentou tornar o modelo o mais simples e uniforme possível. De seguida, são apresentados esses resultados.

9.1. Resultados do segundo modelo

Nesta secção vão ser apresentados, apenas, os resultados mais relevantes. Todos os resultados obtidos estão sob tabela no ANEXO B Inicialmente são apresentados os melhores resultados obtidos para cada tipo de simulação feita. Estas foram subdivididas em número e espessuras de blocos de camadas.

É de referir que tanto nesta secção, como nas seguintes, consideram-se tensões admissíveis quando a tensão obtida no material testado é inferior às tensões limites apresentadas para o mesmo material.

Tabela 15- Tensões máximas, obtidas com as camadas [2,2,2].

Orientação	Espessura (mm)	Tensão máxima (MPa)	Material
0	2	288	Fibra de vidro epóxico
90	2		
0	2		
90	2	316	C (T300) epóxico (934)
0	2		
90	2		

A indicação entre parênteses retos é relativa à espessura das camadas. Cada camada destas é um bloco de camadas, já que cada camada em materiais compósitos não costuma exceder os 0,2 milímetros, para obter uma espessura de dois milímetros nada mais é do que várias camadas sobrepostas com a mesma orientação.

De seguida é feita uma análise comparando a diferença de resultados, entre aplicar ao modelo várias camadas com menores espessuras, ou obtendo a mesma espessura final para a casca, reduzindo o número de blocos de camadas. E por isso foram feitas várias simulações com blocos [2,2,2] e [3,3] ou [2,4,2] e [4,4] milímetros.

Tabela 16- Tensões obtidas para as camadas [3,3].

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
90 0	3 3	242	Fibra de vidro epóxico
0 90	3 3	262	
90 0	3 3	265	Fibra de KEVLAR® epóxico

Pela análise das tabelas 15 e 16, já se nota alguma diferença entre os melhores valores obtidos. Para uma espessura total de camada de seis milímetros, a tensão obtida mais baixa é de 288 MPa para fibra de vidro epóxico quando são usadas três camadas de dois milímetros e 242MPa, quando usadas duas camadas de três milímetros. Ainda pela tabela 16, consegue referir-se a melhoria de tensão obtida para a fibra de vidro epóxico quando a primeira camada está orientada a 90°.

Tabela 17- Tensões obtidos para as camadas [2,4,2].

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
90 0 90	2 4 2	199,8	Fibra de vidro epóxico
90 0 90	2 4 2	236,8	
90 0 90	2 4 2	242	C (T300) epóxico (934)

Tabela 18- Tensões obtidos para as camadas [4,4].

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
90 0	4 4	175	Fibra de vidro epóxico
0 90	4 4	184	Fibra de vidro epóxico
90 0	4 4	192	Fibra de KEVLAR® epóxico
90 0	4 4	199	C (AS4) PEEK (APC2)

Através das tabelas a cima é possível perceber que são obtidos melhores resultados quando, para o mesmo material, o compósito tem menor número de blocos de camadas. Bem como, se nota uma tendência para obter melhores valores, independentemente da espessura, quando a primeira camada está orientada a 90°. No material de fibra de vidro epóxico, à semelhança do que acontece com outros, nota-se que as tensões dependem da espessura da camada, bem como do número de camadas. Com a redução de uma camada, e com a mesma espessura total a tensão máxima verificada passou de quase 200 MPa para 184 e 175 MPa para uma espessura total de 8 milímetros. É de notar, também, conforme era esperado que conforme se aumenta a espessura total, a tensão máxima verificada diminui.

Tabela 19- Tensões obtidas para as camadas [5,5].

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
90 0	5 5	116	Fibra de KEVLAR® epóxico
90 0	5 5	119	Fibra de vidro epóxico
90 0	5 5	119	C (T300) epóxico (934)
90 0	5 5	120	Fibra de carbono epóxico
0 90 0	5 5 5	245	Fibra de vidro S + Strucell P80

Feitas estas simulações, e como as propriedades dos materiais compósitos são definidos para as direções transversais e longitudinais, foi necessário, identificar o ponto onde se verifica a maior tensão, e neste ponto identificar as tensões a que está sujeito. Desta forma, obtiveram-se resultados que serão apresentados de seguida.

A Tabela 20 é referente ao carbono T800H epóxico com dois blocos de camadas de 5 milímetros cada um, sendo o primeiro orientado a 0° e a seguinte a 90°. Este material apresenta uma tensão de *Von Mises* máxima de 169 MPa. Esta tabela pretende desta forma comparar pelo critério da tensão de rotura máxima aferir, comparando as tensões a que a

estrutura está sujeita com este material e as tensões admitidas pelo mesmo, se a estrutura aguenta com o carregamento a que está sujeito.

Tabela 20- Tensões no ponto crítico de C (T800H) epóxico e C (T300) epóxico (934)..

	<i>C (T800H)epóxico</i>		<i>(C T300) epóxico (934)</i>	
S₁₁	-168,5	σ_{uc1} = 1550	-118,5	σ_{uc1} = 1280
	85,2	σ_{uf1} = 2840	36,3	σ_{uf1} = 1314
S₂₂	-23,6	σ_{uc2} = 165	-17,9	σ_{uc2} = 168
	7,4	σ_{uf2} = 52	2,4	σ_{uf2} = 43
S₁₂	-13,7	τ₁₂ = 58	-10,9	τ₁₂ = 48
	18,9		15,2	
Deslocamento	6 mm		6,9	

Através da comparação das tensões obtidas no ponto crítico, onde a tensão é máxima, é possível perceber que as tensões máximas que se verificam são menores que as tensões máximas admissíveis pelo material, logo a estrutura não fraturará.

Os valores referentes ao carbono (T300) epóxico, com camadas orientadas [90,0] com espessuras de 5 milímetros, com tensão máxima de 119 MPa. A Figura 43 mostra a deformação do chassi.

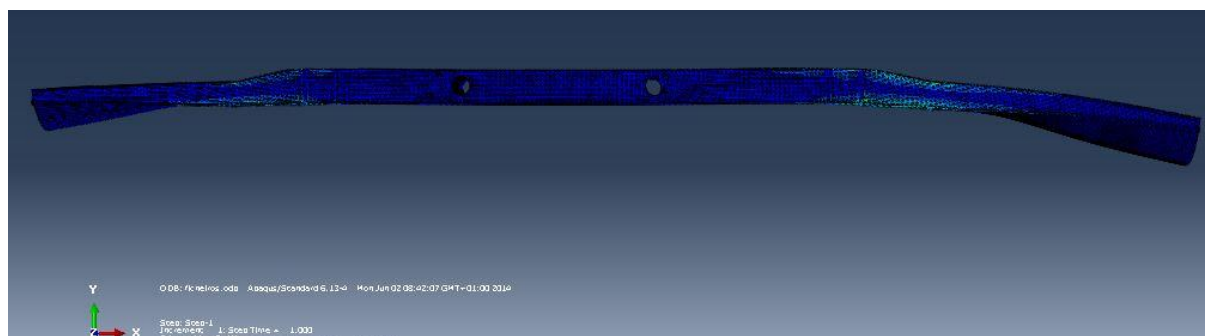


Figura 43- Deformação do chassi (abaqus).

Os resultados na Tabela 21 retratam o comportamento da fibra de vidro epóxico quando testada com dois blocos de material de 5 milímetros orientadas a 90 e 0°. Neste caso a tensão máxima obtida foi de 119 MPa.

Tabela 21- Tensões no ponto crítico de fibra de vidro epóxico e fibra de KEVLAR® epóxico

	Fibra de vidro epóxico		Fibra de KEVLAR® epóxico	
S ₁₁	-135,1	σ _{uc1} =600	-114,91	σ _{uc1} =280
	37,9	σ _{uf1} = 1250	40,1	σ _{uf1} = 1410
S ₂₂	-52,7	σ _{uc2} = 141	-18,3	σ _{uc2} = 141
	12,5	σ _{uf2} = 36	2,7	σ _{uf2} = 28
S ₁₂	-22,8	τ ₁₂ = 63	-9,8	τ ₁₂ = 45
	29,6		13,5	
Deslocamento	12,6 mm		10,9 mm	

Como nos casos anteriores os valores de tensões obtidos estão abaixo dos valores de tensão admissíveis. Apesar de apresentar um dos melhores valores obtidos de tensões máximas verificadas, o chassi quando simulado com este material apresenta o deslocamento máximo obtido, 12,6 milímetros. No caso da fibra de KEVLAR® epóxico nas condições dos ensaios anteriores. A tensão máxima verificada foi de 115,9 MPa.

Quando testada a fibra de carbono epóxico (Tabela 22), o valor da tensão máxima foi de 120 MPa, o que leva a um deslocamento máximo da estrutura de 6,9 milímetros. Percebe-se que à semelhança dos casos anteriores, as tensões verificadas, são admissíveis.

Tabela 22- Tensões no ponto crítico de fibra de carbono epóxico.

S_{11}	-174,3	$\sigma_{uc1} = 1130$
	86,5	$\sigma_{uf1} = 1270$
S_{22}	-20,7	$\sigma_{uc2} = 141$
	5,8	$\sigma_{uf2} = 42$
S_{12}	-9,6	$\tau_{12} = 63$
	13,4	

Todos os valores de tensões e deslocamentos obtidos encontram-se no ANEXO C.

9.2. Resultados do primeiro modelo

Primeiramente foi feita a simulação do modelo real definindo como material Aço, como foi dito anteriormente. Desta forma, a tensão máxima a que o chassi está sujeito são 151 MPa, para uma espessura de 2 milímetros. Foi feito o mesmo estudo de seguida para o alumínio, aqui foi perceptível que para dois milímetros a tensão máxima verificada era superior à tensão de cedência considerada para este material. Assim, foi possível concluir que para uma espessura de 4 milímetros de alumínio, o chassi já só apresentava tensões máximas de 76 MPa, valor esse admissível. A deformação do chassi pode ser vista na Figura 44.

Tabela 23- Deslocamentos máximos para diferentes espessuras de aço e alumínio.

<i>Material</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Deslocamento (mm)</i>
Aço	2	1,9
Alumínio	2	5,7
Alumínio	4	2,8

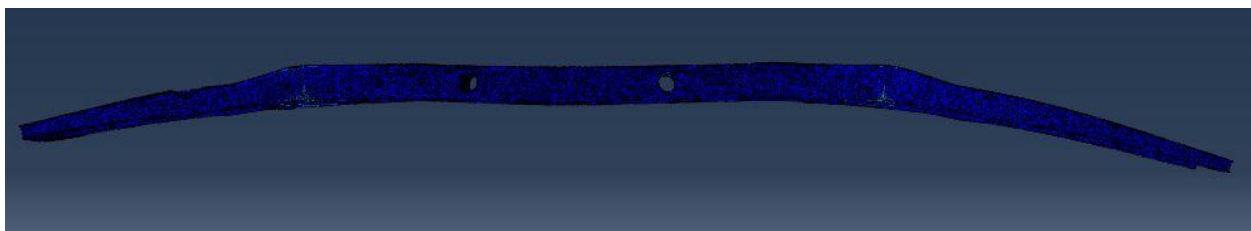


Figura 44- Exemplo de deformação do 1º modelo (abaqus).

Passando para as simulações em materiais compósitos, estas foram feitas no primeiro modelo, depois de obtidos os resultados no segundo modelo, já que: 1) A produção do

segundo modelo em materiais compósitos é mais fácil do que a construção do primeiro; 2) a partir do segundo modelo consegue-se fazer logo uma seleção de alguns materiais, já que as simulações demoram o seu tempo e assim, menos tempo seria perdido em vão.

Tabela 24- Tensões máximas para o primeiro modelo para C (T800H) epóxico.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>	<i>Material</i>
90	5	73,7	C (T800H) epóxico
0	5		

Tabela 25- Tensões no ponto crítico de C (T800H) epóxico.

S_{11}	-76	$\sigma_{uc1} = 1550$
	29,9	$\sigma_{uf1} = 2840$
S_{22}	-5,1	$\sigma_{uc2} = 165$
	13,8	$\sigma_{uf2} = 52$
S_{12}	-8,9	$\tau_{12} = 58$
	7,2	

O deslocamento máximo verificado é de 1,3 milímetros.

No caso do carbono C (T300) epóxico quando simulado para o primeiro modelo para duas camadas de cinco milímetros orientadas a [90,0] apresentou como tensão máxima 74,1 MPa, enquanto o carbono (AS4) PEEK para as mesmas condições apresentou 71,8 MPa. Na tabela seguinte estão descritas as tensões no ponto crítico de ambos os materiais.

Tabela 26- Tensões no ponto crítico de C (T300) epóxico e C (AS4) PEEK, primeiro modelo.

	<i>C (T300) epóxico</i>		<i>C (AS4) PEEK</i>	
S₁₁	-76,9	σ_{uc1} =1280	-74,5	σ_{uc1} =1100
	29,9	σ_{uf1} = 1340	29,2	σ_{uf1} = 2130
S₂₂	-6,4	σ_{uc2} = 168	-5,9	σ_{uc2} = 200
	17,9	σ_{uf2} = 43	16,3	σ_{uf2} = 80
S₁₂	-8,1	τ₁₂ = 48	-8,7	τ₁₂ = 160
	6,5		7	
Deslocamento	1,5 mm		1,5 mm	

No caso da fibra de vidro epóxico e da fibra KEVLAR® epóxico, as tensões verificadas foram, respetivamente 38,3 e 80,3 MPa.

Tabela 27- Tensões no ponto crítico de fibra de vidro epóxico e fibra de KEVLAR® epóxico, primeiro modelo.

	<i>Fibra de vidro epóxico</i>		<i>Fibra de KEVLAR® epóxico</i>	
S₁₁	-43	σ_{uc1} = 600	-83,2	σ_{uc1} =280
	19	σ_{uf1} = 1250	32,2	σ_{uf1} = 1410
S₂₂	-14	σ_{uc2} = 141	-6,6	σ_{uc2} = 141
	36	σ_{uf2} = 36	18,7	σ_{uf2} = 28
S₁₂	-12	τ₁₂ = 63	-7	τ₁₂ = 45
	10		5,6	
Deslocamento	3,13 mm		2,6 mm	

Tabela 28- Tensões máximas para o primeiro modelo para fibra de carbono epóxico.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>	<i>Material</i>
90	5	78,2	Fibra de carbono epóxico
0	5		

Tabela 29- Tensões no ponto crítico de carbono epóxico, primeiro modelo.

S_{11}	-80,5	$\sigma_{uc1} = 1130$
	31,5	$\sigma_{uf1} = 1270$
S_{22}	-4,9	$\sigma_{uc2} = 141$
	14,1	$\sigma_{uf2} = 42$
S_{12}	-8,1	$\tau_{12} = 63$
	6,5	

Verificando um deslocamento máximo de 1,6 milímetros.

Tabela 30- Tensões máximas para o primeiro modelo para a estrutura sanduiche.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>	<i>Material</i>
0	5	208	Fibra de vidro E e <i>Strucell</i> P80
90	5		
0	5		

Depois de efetuadas as simulações dos materiais anteriores, foi perceptível entender que numa estrutura sanduiche, para se obter uma tensão máxima na ordem das obtidas anteriormente, a espessura da camada teria de ser bem superior às testadas nos materiais compósitos. E por isso, esta opção foi descartada.

9.3. Resultados do modelo híbrido

Quanto ao modelo híbrido, são apresentados, apenas os resultados relativos ao material C (AS4) PEEK, porque é o único que apresenta deformações admissíveis.

Tabela 31- Tensões máximas para o modelo híbrido com C (AS4) PEEK

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (Mpa)</i>	<i>Material</i>
90	5	122	C (AS4) PEEK
0	5		
-	4		
			Alumínio

Tabela 32- Tensões no ponto crítico de C (AS4) PEEK, modelo híbrido

S_{11}	-120,5 33,3	$\sigma_{uc1} = 1100$ $\sigma_{uf1} = 2130$
S_{22}	-16,7 21,4	$\sigma_{uc2} = 200$ $\sigma_{uf2} = 80$
S_{12}	-11,5 16,17	$\tau_{12} = 160$
Deslocamento	11,1 mm	

Para além disso, apresenta um valor de deslocamento intermédio comparado com os restantes materiais testados. Todos os resultados podem ser vistos no ANEXO B e ANEXO C.

A Figura 45 mostra a deformação a que a estrutura híbrida está sujeita.

9.4. Rigidez dos modelos

Como abordado na secção 6.1.1 para a rigidez de torção foram feitas as simulações que tornaram possível o cálculo da rigidez dos diferentes modelos.

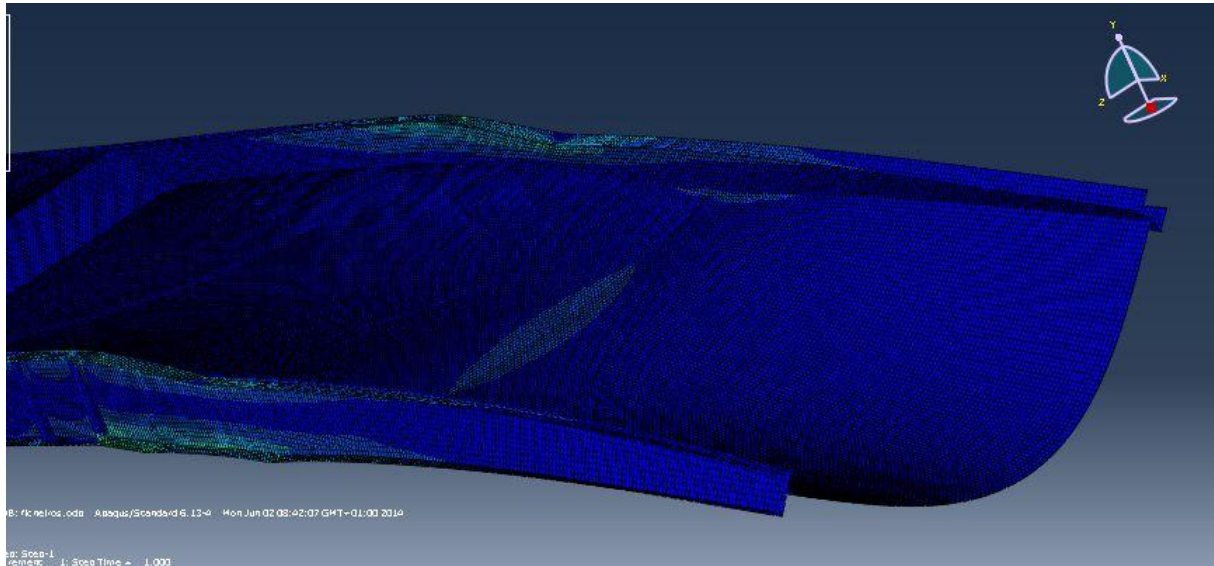
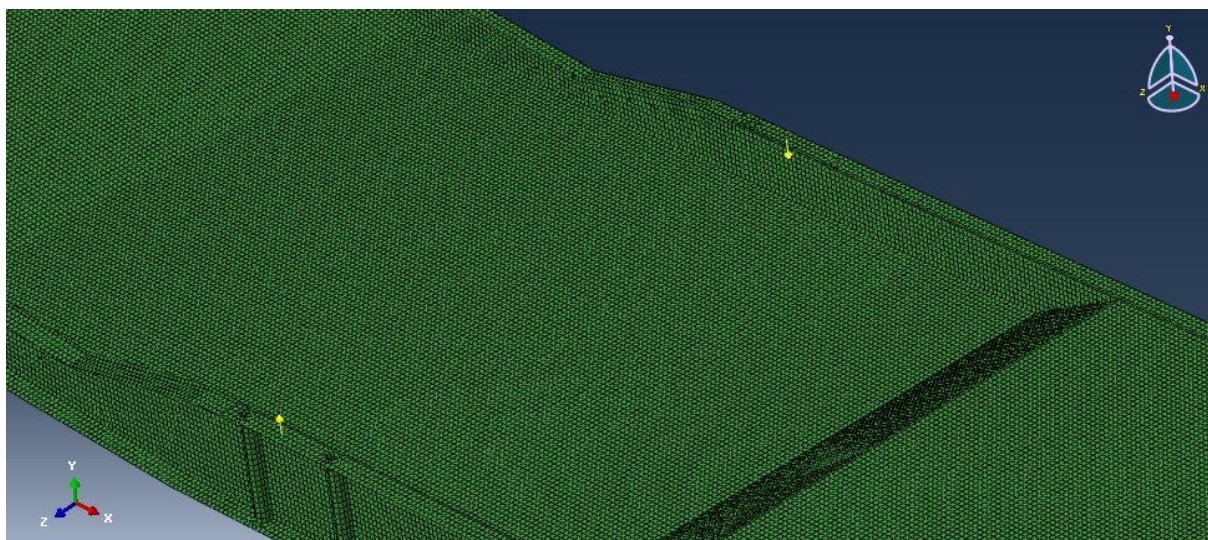


Figura 45- Exemplo de deformação da estrutura híbrida (abaqus).



As forças foram aplicadas nos pontos intermédios entre os apoios do chassi (pode ser visto na Figura 46), sendo que se mantiveram os encastramentos no outro extremo do chassi. E aplicando esta deformação e retirando o deslocamento causado nestes dois pontos foi possível em ambos os modelos retirar os valores da rigidez, através da fórmula apresentada na secção 6.1.1. Para isso foram utilizados os seguintes valores para as variáveis da fórmula apresentada:

Tabela 33- Valores utilizados.

F	1000 N
L	562 mm

Na Tabela 36 seguintes são apresentados os resultados obtidos para os dois modelos.

Tabela 34- Rigidez para o primeiro e segundo modelo.

<i>Segundo modelo</i>		<i>Modelo Original</i>	
<i>Material</i>	<i>Rigidez (Nm/°)</i>	<i>Material</i>	<i>Rigidez (Nm/°)</i>
Carbono T800H epóxico	459	Carbono T800H epóxico	395
Carbono T300 epóxico	433	Carbono (AS4) PEEK	388
Fibra de carbono epóxico	425	Carbono T300 epóxico	387
Fibra de vidro epóxico	408	Fibra de carbono epóxico	385
Fibra de KEVLAR® epóxico	392	Fibra de vidro epóxico	377
Carbono (AS4) PEEK	392	Fibra de KEVLAR® epóxico	373
		Aço	395
		Alumínio	384

Pela Tabela 34, pode perceber-se que o modelo com maior rigidez é o proposto para materiais compósitos. Isto vai de encontro ao que foi dito ao longo deste documento.

Na secção seguinte é feita a discussão de todos estes resultados que aqui foram mostrados.

9.5. Rigidez dos modelos

Usando o critério de rotura de *Tsai-Hill*, abordado anteriormente neste documento, os resultados estão apresentados na Tabela 35.

Tabela 35- Valor de α para o segundo modelo.

<i>Material</i>	<i>Valor de α</i>
Carbono (T800H) epóxico	0,37
Carbono T300 epóxico	0,34
Carbono (AS4) PEEK	0,31
Fibra de vidro epóxico	0,63
Fibra de KEVLAR® epóxico	0,50
Fibra de carbono epóxico	0,31

A partir destes valores pode perceber-se que nenhum dos materiais entra em rotura quando aplicado ao segundo modelo do chassi. Já no modelo original os valores obtidos estão apresentados na Tabela 36.

Tabela 36- Valor de α para o primeiro modelo.

<i>Material</i>	<i>Valor de α</i>
Carbono (T800H) epóxico	0,10
Carbono T300 epóxico	0,21
Carbono (AS4) PEEK	0,05
Fibra de vidro epóxico	1,04
Fibra de KEVLAR® epóxico	0,59
Fibra de carbono epóxico	0,14

Os resultados obtidos foram de alguma forma interessantes, já que na sua maioria o valor de α diminui, exceto nos casos da fibra de vidro epóxico e na fibra de KEVLAR® epóxico. Para além disto é de referir que por esta análise o chassi quando aplicada fibra de vidro epóxico entra em rotura. Por se considerar um valor muito desfasado da generalidade, vai ser um dos valores comparados com o critério de *Hashin*.

Este critério permite a análise de resultados na fibra (como na Figura 47) e na matriz do compósito quando estes estão à tração e/ou à compressão, como representado na Figura 48).

Os valores obtidos para a fibra de vidro serão apresentados, recorrendo a imagens retiradas da simulação em *abaqus*.

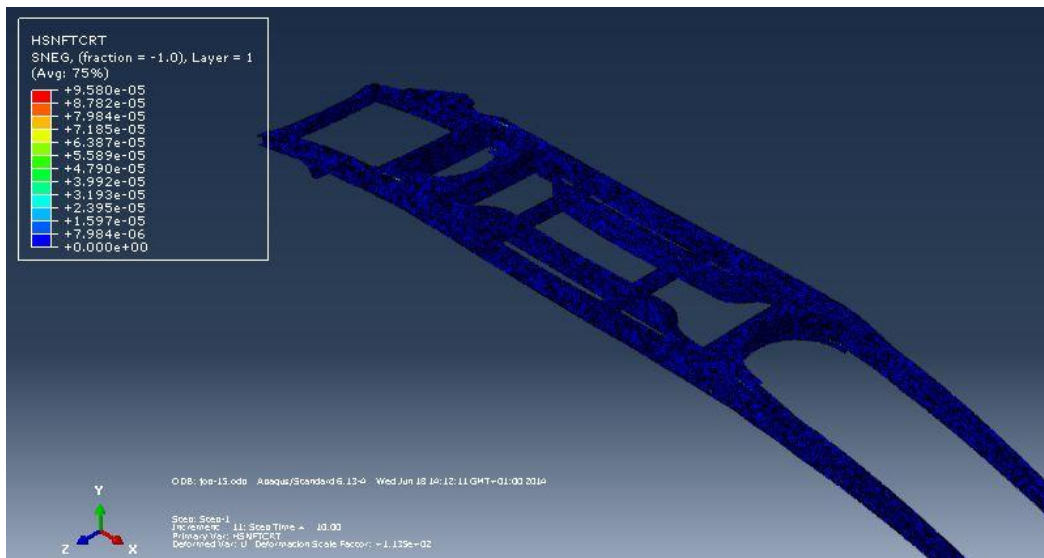


Figura 47- Critério de *Hashin*, fibra de vidro epóxico à tração (abaqus).

Neste critério, desde que os valores da simulação estejam abaixo da unidade, significa que a fibra e/ou a matriz não sofrem qualquer dano. Os valores que se pretendem analisar são os do canto superior esquerdo das figuras.

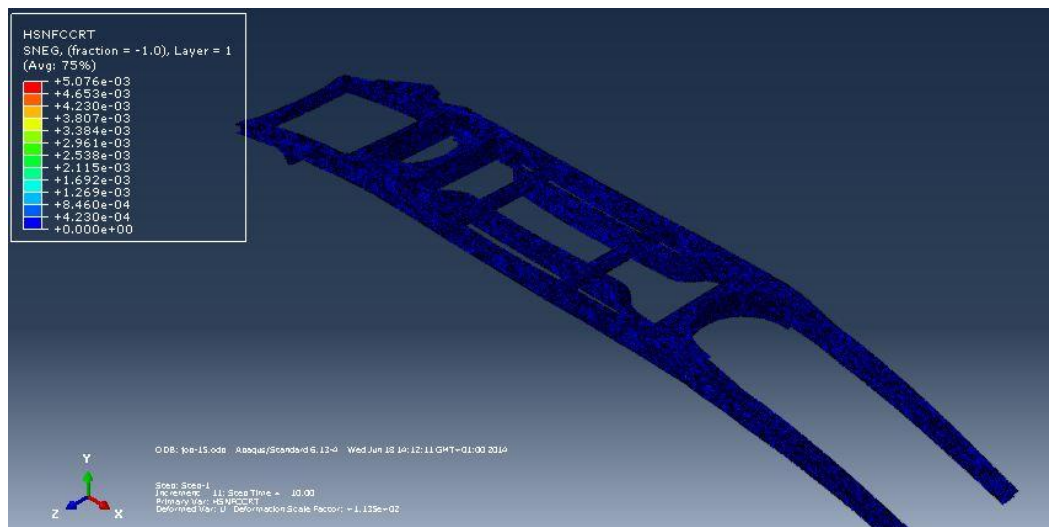


Figura 48- Critério de *Hashin*, fibra de vidro epóxico à compressão (abaqus).

Para além da análise separada da fibra e da matriz (Figura 49), permite também obter resultados quando estas se encontram à compressão e/ou à tração.

Pelos resultados obtidos, é facilmente perceptível que não existe dano quando aplicada a fibra de vidro epóxico, ao contrário do resultado apresentado pelo critério de *Tsai-Hill*.

Apesar dessa contradição, os resultados considerados foram os do critério de *Hashin*, por este ser o mais utilizado e indicado para os materiais compósitos e porque permite uma análise mais abrangente das deformações que ocorrem no material. Para além disto, os valores obtidos estão bem longe da unidade, sendo a sua grandeza mais baixa de 10^{-2} (na Figura 49) e por isso, considera-se que será um valor com um coeficiente de segurança bastante elevado.

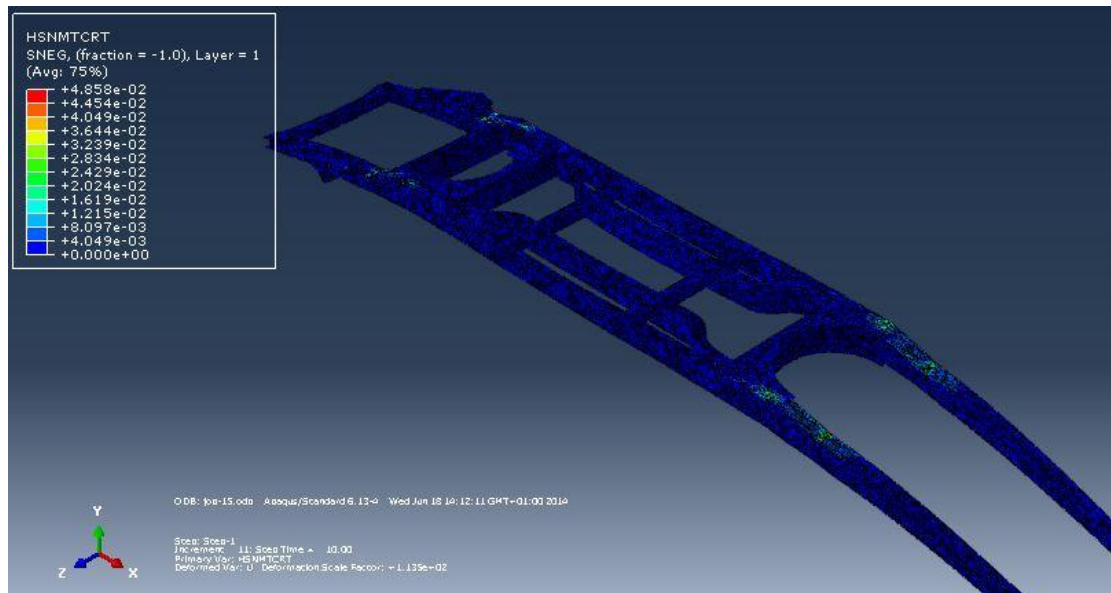


Figura 49- Critério de *Hashin*, matriz da fibra de vidro epóxico à compressão (abaqus).

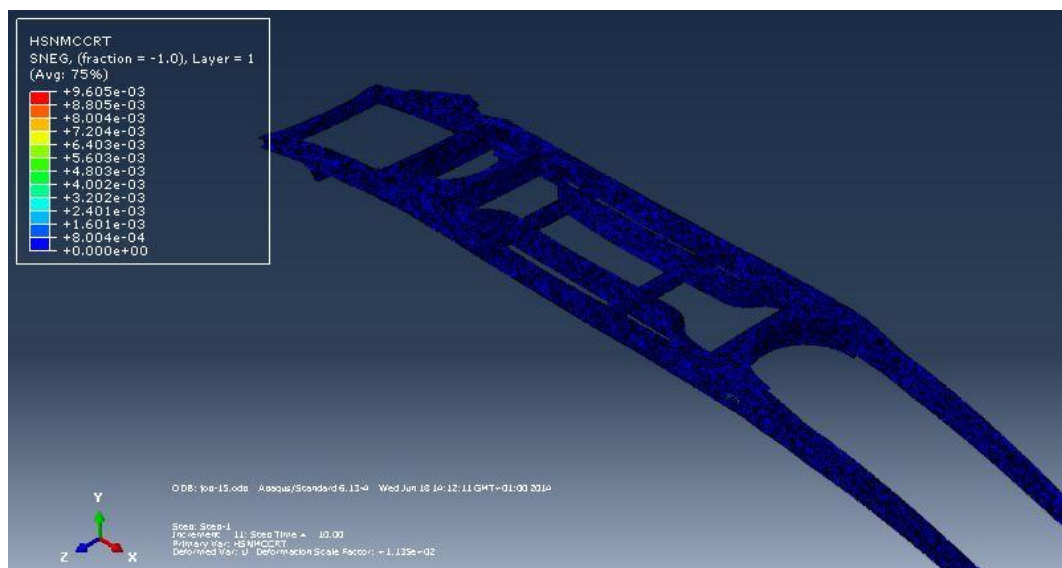


Figura 50- Critério de *Hashin*, matriz da fibra de vidro epóxico à tração (abaqus).

Apresentados os resultados, no capítulo seguinte será feita a discussão dos mesmos.

10 Discussão dos resultados

É um facto que se pensarmos no resultado do ponto crítico poderá não fazer muito sentido se soubermos que o motor é na parte dianteira do veículo e o *software* assinala o ponto crítico na traseira do mesmo. É de referir que a simulação foi feita considerando o carro carregado no seu máximo, daí a carga uniformemente distribuída, já que o peso dos três passageiros mais a bagageira na parte traseira do veículo, compensará o peso do motor mais os dois passageiros da frente. E como este chassi não é simétrico estando a parte traseira mais afastada dos apoios, é por isso natural que quando carregado, a tensão máxima seja atrás porque essa força distribuída resultará num maior momento flector na traseira do que na dianteira.

A primeira simulação a realizar foi a do modelo original, para o material utilizado, assim sendo, para o aço, e sendo a estrutura em casca, com uma espessura média de 2 milímetros, olhando para a geometria, já era de esperar que o ponto crítico fossem os apoios roscados, que levariam a alguma concentração de tensões, resultado que foi confirmado. Apesar disso, não existe qualquer risco, já que a tensão máxima lida pelo *software* (151,8 MPa) se encontra a uma distância bem significativa da tensão de cedência do material (235 MPa). O facto de quando se testam os materiais metálicos ser necessário aumentar a espessura quando se pensa na substituição de aço por alumínio, não é algo que interfira de forma negativa na dinâmica do componente, até porque o alumínio é menos denso que o aço (quase 3 vezes menos denso) o que significa que mesmo duplicando a espessura do alumínio, este chassi ficará ainda mais leve do que o original em Aço. E só com essa mudança consegue-se uma redução de peso a rondar os 30%.

Quando feita a comparação com o modelo híbrido, a estrutura fica praticamente com o mesmo peso do modelo original em aço, já que se simularam 4 milímetros de alumínio mais o material compósito. Desta forma e de acordo com os objetivos traçados no início, as duas sugestões são válidas.

Quando comparados os modelos originais e compósitos há questões que podem ser levantadas, principalmente porque o modelo compósito revela maiores tensões do que o modelo original e por isso qual seria a vantagem de alterar o componente. Para além da melhoria do processo de produção na sua facilidade de execução, a diferença de tensões pode acontecer, porque se no primeiro modelo, por este não ter as duas extremidades ligadas, leva a que o chassi só sofra flexão nas suas extremidades. O mesmo não acontecerá quando de unem as duas longarinas, introduz-se rigidez ao modelo, e isso faz com que os esforços sejam transferidos e somados nas áreas críticas e daí o valor das tensões ser maior.

Apesar disto torna-se necessário, também, fazer uma análise aos deslocamentos máximos sofridos pelo chassi e desta forma, no modelo original usando materiais compósitos é possível obter um deslocamento inferior ao verificado no modelo em aço. Ainda assim, não foi considerado que os melhores deslocamentos verificados no segundo modelo (apesar de

superiores aos deslocamentos do modelo original) fossem graves ao ponto de resultarem em rotura do material, até porque as tensões verificadas estão bem a baixo das tensões limite do material.

Poderá achar-se que deveria ser feito um estudo de otimização quanto à espessura dos blocos de camadas dos materiais compósitos, já que as tensões observadas quando comparadas com as tensões limites do material, têm uma distância grande. Esse estudo não se considerou relevante, já que, pensando num elemento estrutural, projetado para sofrer vários ciclos de esforços e sujeito a fadiga é necessário ter algum coeficiente de segurança do que é obtido em simulações e o que poderá acontecer na realidade, até porque o comportamento deste tipo de materiais não é constante, ou seja, se projetarmos o chassi para durar 20 anos o decréscimo das tensões limites do material devido a impactos pode reduzir em cerca de dez vezes. Assim, e ao contrário do que se verifica, poderia ocorrer a rotura do componente.

Uma das vantagens fundamentais dos laminados é a sua capacidade de se adaptar e controlar a orientação das fibras de modo a que o material poderá resistir de melhor forma a cargas. E por essa razão, é importante saber as camadas que contribuem para a resistência do laminado, tendo em conta a sua orientação relativa em relação à direção do carregamento. Desta forma, foram feitas várias simulações com diferentes orientações dos blocos de camadas, as quais revelaram melhores resultados quando a primeira camada está orientada a 90°. Para além disto, era já esperado que os valores das tensões obtidas fossem melhorando consoante se ia aumentando a espessura dos blocos de camadas. Tratam-se de blocos de camadas, porque uma camada de material compósito costuma rondar os dois décimos de milímetro. E como também se verificou que quanto maior o número de camadas, para a mesma espessura total, maior o valor das tensões verificadas, considerou-se que um conjunto de várias camadas com a mesma orientação, seria uma boa solução. Cada 5 milímetros de camadas são então várias camadas de iguais espessuras, com iguais orientações. Considerando cada camada com 0,2 milímetros, teremos 25 camadas para cada espessura de 5 milímetros.

Para ajudar na escolha dos materiais a utilizar fez-se uma análise quanto à rigidez do chassi, quando simulado com os diferentes materiais. Nesse instante percebeu-se que se conseguiria uma maior rigidez com o carbono T800H epóxico (460 Nm/°), seguido do carbono T300 epóxico com 433Nm/° e segue-se o vidro epóxico com 408Nm/°. Estes resultados são melhores do que os calculados para o modelo original, já que para o carbono T800H epóxico apresenta uma rigidez de 395 Nm/° o carbono (AS4) PEEK com uma rigidez de 388 Nm/° e seguido deste temos o carbono T300 epóxico 387 Nm/°. Isto reforça aquilo que foi dito anteriormente quanto à rigidez dos diferentes modelos.

Os materiais compósitos são elásticos até à sua rotura e é por isso que não podem ser comparados como os materiais metálicos. Desta forma, apenas a comparação com a tensão limite pode não ser suficiente e por isso é feita a comparação das tensões no ponto crítico e é calculada a rigidez do chassi. Além disso, foi feito o estudo quanto à rotura do material. E usando dois critérios, foi possível perceber que nenhum dos materiais sofreria dano e entraria em rotura.

Quanto ao modelo híbrido, o único material que se identificou como admissível, já que nenhuma das tensões verificadas no ponto crítico ultrapassa as tensões admitidas pelo material. Apesar disso, era possível encontrar outras soluções se fosse aumentada a espessura da camada, mas a ideia deste projeto era conseguir comparar os três modelos. O carbono (AS4) PEEK é caro.

Foram feitas simulações para as estruturas sanduiche, mas percebe-se, também, que a tensão máxima obtida para este material, era bastante distanciado dos restantes valores obtidos. E por isso, considerou-se que aumentar a espessura não seria viável, e a solução em estruturas sanduiche foi posta de lado.

11 Conclusões e trabalhos futuros

Nesta fase do projecto é necessário refletir em todo o trabalho elaborado. Algumas dificuldades foram sentidas na passagem do *solidworks* para o *abaqus*. Apesar de haver alguma experiência a usar este último *software* mencionado, este não permitia a formação da malha que era pretendida e de maneira a resolver este problema foi necessária ajuda através do *software* ANSA. Depois disso, foi necessário perder ainda bastante tempo na rectificação da geometria. O chassi foi modelado inicialmente à escala real e no *abaqus* foi simulado como casca (ou seja, sem espessura) e houve muito tempo dispendido nesta fase. Apesar disso, considera-se que foram atingidos todos os objetivos. São apresentados os três modelos possíveis, cada um com pelo menos uma solução admissível e sem o aumento de peso da estrutura.

O uso do método dos elementos finitos torna possível a aplicação de um sistema de forças em qualquer ponto e/ou direção, promovendo assim, informações sobre o deslocamento e o grau de tensão provocado por essas cargas ao elemento, situação que analiticamente necessita de simplificações para se conseguir chegar a resultados aproximados. Este método no *software abaqus* permite, de uma maneira bastante expedita, obter os dados que necessitamos. Cada simulação efectuada demorou perto de meia hora, mas depois desta qualquer informação à cerca do modelo poderia ser reportada para melhor se perceber o que nele acontecia.

Como era esperado, ligando as longarinas por uma camada de material, está a aumentar-se a rigidez do chassi e isso é comprovado pelos resultados obtidos quando calculada a rigidez do chassi nos diferentes modelos e materiais. Em todos os casos se verifica que os valores de rigidez obtidos no segundo modelo são superiores ao valores obtidos no modelo original, o que é uma mais valia para o modelo proposto.

Para a escolha do melhor material, há que referir que apesar do chassi em qualquer dos carbono epóxico referido no documento ter maior resistência à rotura, a fibra de vidro é conhecida por ter uma maior resistência ao impacto e muito boa resistência à fadiga. Além disso, não se pode esquecer o custo por quilo de cada material e aqui podemos referir que os carbonos T300 e T800H epóxico rondarão os 50€/kg enquanto que o carbono epóxico e a fibra de vidro epóxico custará por volta de 30 euros por quilo. Isto são tudo factores que têm de ser tidos em conta quando se pretende escolher um material para a produção.

Foi possível perceber pelos resultados obtidos, que, é preferível a primeira camada dos materiais compósitos ter uma orientação de 90° e que com o aumento da espessura do bloco de camadas as tensões máximas verificadas vão diminuindo, bem como, se obtêm melhores resultados para um menor número de camadas, para a mesma espessura total.

Quando se refletiu na modelação do molde, percebeu-se que realmente o modelo apresentado, de igual forma que o original não seria possível de produzir a partir de um molde. As longarinas são compostas por duas abas e estas não permitem que o componente consiga ser retirado do molde. Apesar disto, considera-se que os objetivos foram todos

conseguidos. São apresentados modelos funcionais, o estudo da aplicação dos materiais compósitos foi feito e é possível fazer essa transformação e produção do modelo em materiais compósitos e num modelo híbrido.

Com este estudo foi possível perceber que só com a substituição do aço em alumínio, haveria uma redução de 30% do peso, entre o aço e aplicada a fibra de vidro epóxico, reduziria-se o peso do chassi em praticamente 49% e fazendo a substituição para as fibras de carbono epóxico poderia conseguir-se uma redução de praticamente 59%.

Considera-se o critério de *Hashin* mais completo, permitindo a análise de dano quer na fibra quer na matriz. Foi uma forma de confirmação de resultados, onde percebemos que com nenhum material há rotura do componente.

As fibras de vidro apresentam um custo bem inferior das fibras de carbono e aramida. Entretanto, deve-se analisar que para se atingir o mesmo nível de um reforço dimensionado com fibra de carbono utilizando-se fibra de vidro, é necessária a utilização de uma quantidade bem maior de fibra de vidro em relação à quantidade de fibra de carbono utilizada. A utilização de uma maior quantidade de fibra, por sua vez, exige a utilização de mais resina ou adesivo e consome mais horas de trabalho, aumentando o custo de utilização do sistema. Portanto, somente a análise da relação custo-benefício referente à utilização de cada sistema de reforço permitirá a escolha da fibra mais adequada para formar o compósito.

Além disso, não se devem descurar os custos relativos aos processos de fabrico. O material a utilizar deve ser escolhido pensando em todos estes casos descritos. Tendo o processo em autoclave, um dispêndio de energia muito grande, bem como um investimento inicial superior, conseguem-se propriedades ótimas, mas não permite a produção em série. Já no caso do RTM e do VARTM é possível a produção em série, as propriedades apesar de próximas já não são tão boas, mas ainda assim há um investimento em moldes ou sacos de vácuo necessários para a realização do processo que por comparação é inferior ao exigido no caso do autoclave.

Como trabalhos futuros considera-se que seria interessante conseguir fazer um modelo e testá-lo de maneira a comparar os resultados com os obtidos nas simulações. Testar os modelos quando sujeitos a ciclos de fadiga e ao impacto. Ainda antes de produzir é importante considerar também os esforços e cargas transmitidas pelo sistema de amortecimento e suspensão do veículo. Além disto, considera-se que seria interessante produzir o modelo, ou pelo menos um protótipo em escala reduzida, pelos quatro métodos referidos como os melhores para este componente e a partir daí comparar os resultados dos modelos pelos diferentes processos.

12 Referências e Bibliografia

- 2cv/Dyane, Portugal Club. 2009. "Citroën 2CV". <http://www.club2cv-dyaneportugal.pt/forum/viewtopic.php?f=14&t=143>.
- Almeida, Pedro Miguel Vasques Eusébio da Costa. 2013. "FEUP BUS/CIVITAS". Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, FEUP. Acedido a 03-03-2014.
- Ashby, Michael F. 2002. *Materials selection in mechanical design*. 1999. Pergamon Press, Oxford.
- Ashby, Michael F e D Cebon. 1993. "Materials selection in mechanical design." *Le Journal de Physique IV* no. 3 (C7):C7-1-C7-9.
- BMW. 2013. "BMW i". Acedido a 11-03-2014. <http://www.bmw.pt/>.
- Broughton, W.R., L.E. Crocker e R.L. Gower. 2002. *Design Requirements for Bonded and Bolted Composite Structures*. National Physical Laboratory.
- Campbell, F. C. 2004. *Manufacturing Processes for Advanced Composites*. Editado por Elsevier Advanced Technology.
- Costin, Michael; Phipps, David 1967. *Racing and sports car chassis design*. R. Bentley.
- Cramer, David R, David F Taggart e H Inc. 2002. "Design and manufacture of an affordable advanced-composite automotive body structure". Comunicação apresentada em Proceedings of The 19th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition.
- Davies, J. M., Studies International Council for Building Research, Documentation e European Convention for Constructional Steelwork. 2001. *Lightweight Sandwich Construction*. Wiley.
- Ces EduPack 2013.
- Esteves, José Luís. 2009. *Novos Materiais e Novas Estruturas*.
- F1Technical. 2004. "Renault R24". Acedido a 10-03-2014. <http://www.f1technical.net/f1db/cars/878/renault-r24>.
- Ferrari. 2012. "Chassis F1 Composite". Acedido a 16-02. http://www.ferrari.com/english/gt_sport%20cars/racinginnovation/Pages/f1-composite-chassis.aspx.
- Gay, Daniel, Suong V Hoa e Stephen W Tsai. 2002. *Composite materials: design and applications*. CRC press.
- Hägele, N. e C. M. Sonsino. 2012. "Structural durability design recommendations for forged automotive aluminium chassis components submitted to spectrum and environmental loadings by the example of a tension strut." *International Journal of Fatigue* (0). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112312001351>.
- ImagineLifestyles.Com. 2013. "Ferrari Composite Chassis para Modelo híbrido Unveiled". Acedido a 10-03-2014. <http://www.imaginelifestyles.com/luxuryliving/2012/10/ferrari-composite-chassis>.

- Kanolan. 2011. "The Composite Chassis of the Solar Car". <http://solarcar.engin.umich.edu/2011/02/the-composite-chassis-of-the-solar-car/>.
- Koronis, Georgios, Arlindo Silva e Mihail Fontul. 2013. "Green composites: A review of adequate materials for automotive applications." *Composites Part B: Engineering* no. 44 (1):120-127. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836812004350>.
- Lotti, Raquel S, André Wilson Machado, Ênio Tonani Mazzeiro e Janes Landre Júnior. 2006. "Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos." *Rev Dental Press Ortod Ortop Facial* no. 11 (2):35-43. Acedido a 20-04-2014.
- Mangino, Enrico, Joe Carruthers e Giuseppe Pitarresi. 2007. "The future use of structural composite materials in the automotive industry." *International journal of vehicle design* no. 44 (3):211-232.
- Marques, António Torres. 2013. "Materiais Compósitos: Conceber e Fabricar para Durar."
- Marsh, Julian. 1996. <http://www.citroenet.org.uk/passenger-cars/michelin/2cv/history/1949.html>.
- Mat, Mohd Hanif e Amir Radzi Ab Ghani. 2012. "Design and Analysis of 'Eco' Car Chassis." *Procedia Engineering* no. 41 (0):1756-1760. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812027798>. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.379>.
- Moura, Marcelo Francisco de Sousa Ferreira de, Alfredo Manuel Balacó de Morais e António Gonçalves de Magalhães. 2011. *Materiais compósitos materiais, fabrico e comportamento mecânico*. Vol. 2ª ed. Porto: Publindústria, Edições Técnicas.
- Nor, Mohd Azizi Muhammad, Helmi Rashid, Wan Mohd Faizul Wan Mahyuddin, Mohd Azuan Mohd Azlan e Jamaluddin Mahmud. 2012. "Stress Analysis of a Low Loader Chassis." *Procedia Engineering* no. 41 (0):995-1001. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812026744>.
- Parlamentosu, Avrupa e Avrupa Birliği Konseyi. 2005. "Directive 2005/36/EC of the European Parliament and of the Council of 7 September 2005 on the recognition of professional qualifications." *Official Journal of the European Union*.
- Perelles, DH, MF Medeiros e MR Garcez. 2013. "Revista ALCONPAT." *Revista ALCONPAT* no. 3 (3):165-180.
- ROWIECKI, ALEXANDRE. 2007. Porsche RS Spyder. <http://coelhoautomobilismo.blogspot.pt/2007/07/porsche-rs-spyder.html>.
- Sakundarini, Novita, Zahari Taha, Salwa Hanim Abdul-Rashid e Raja Ariffin Raja Ghazila. 2013. "Optimal multi-material selection for lightweight design of automotive body assembly incorporating recyclability." *Materials & Design* no. 50 (0):846-857. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913002938>.
- Santos, Abel Dias dos. 2013. apontamentos da cadeira SIMULAÇÃO DE PROCESSOS TECNOLÓGICOS.
- Savage, Gary. 2008. *Composite Materials Technology in Formula 1 Motor Racing*.
- Seal Web Design. 2009. "Vehicle Chassis Designs". Acedido a 05-03-2014. <http://www.howcarswork.co.uk/modules/articles/article.php?id=16>.
- Tsai, Stephen W. 2008. *Strength & life of composites*. Composites Design Group, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University.
- Ulrich, Karl T e Steven D Eppinger. 1995. *Product design and development*. Vol. 384: McGraw-Hill New York.
- Wass, Carl Andersson Eurenus; Niklas Danielsson; Aneesh Khokar; Erik Krane; Martin Olofsson; Jacob. 2013. "Analysis of Composite Chassis". Bachelor Thesis in Applied Mechanics, The Department of Applied Mechanics- Division of Vehicle Engineering and Autonomous Systems, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.

Xenia Materials. 2012. "Hi-tech from materials". Acedido a 14-02-2014.

Yang, Yongxiang, Rob Boom, Brijan Irion, Derk-Jan van Heerden, Pieter Kuiper e Hans de Wit. 2012. "Recycling of composite materials." *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* no. 51 (0):53-68.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270111002029>.

ANEXO A: Caracterização dos Materiais Compósitos

Resistência à tração dos materiais compósitos

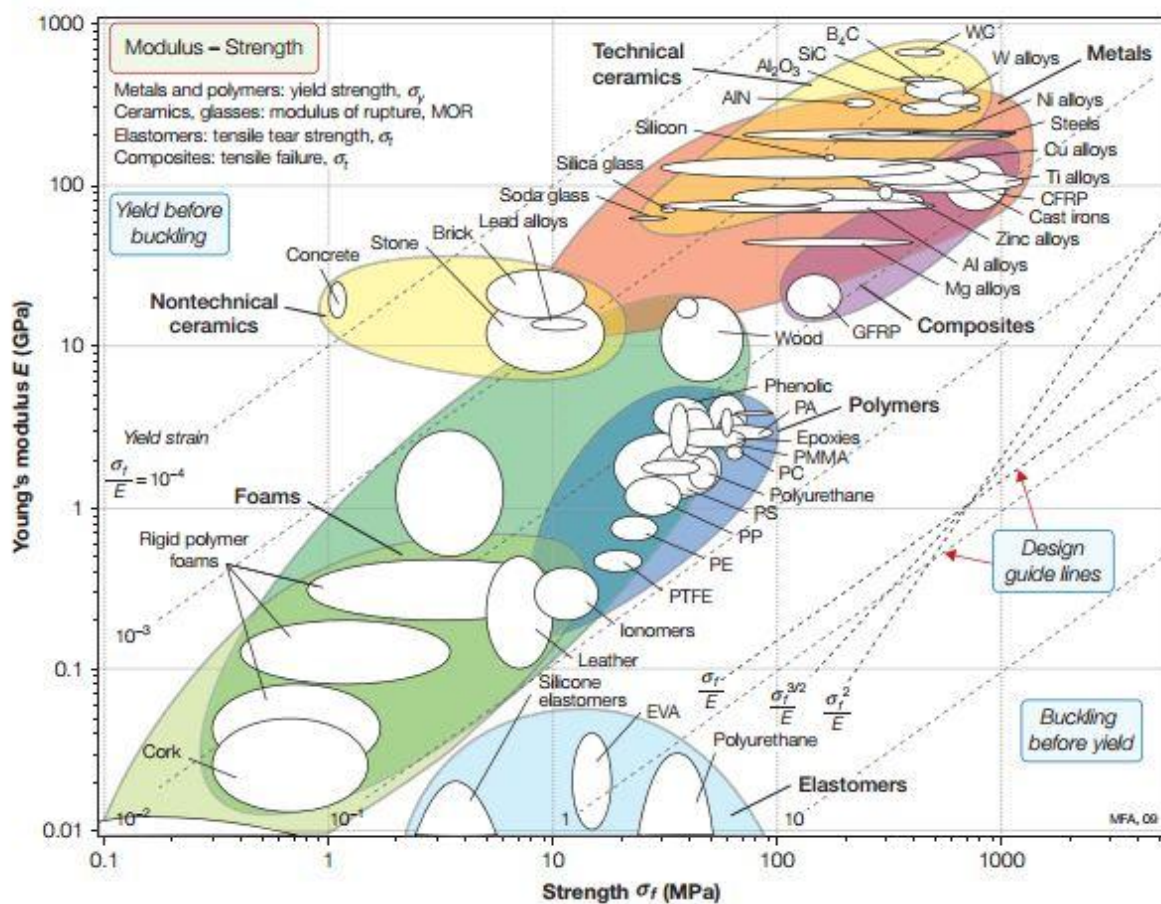


Figura 51- Resistência à tração dos materiais compósitos (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007).

Eficiência mecânica dos materiais compósitos

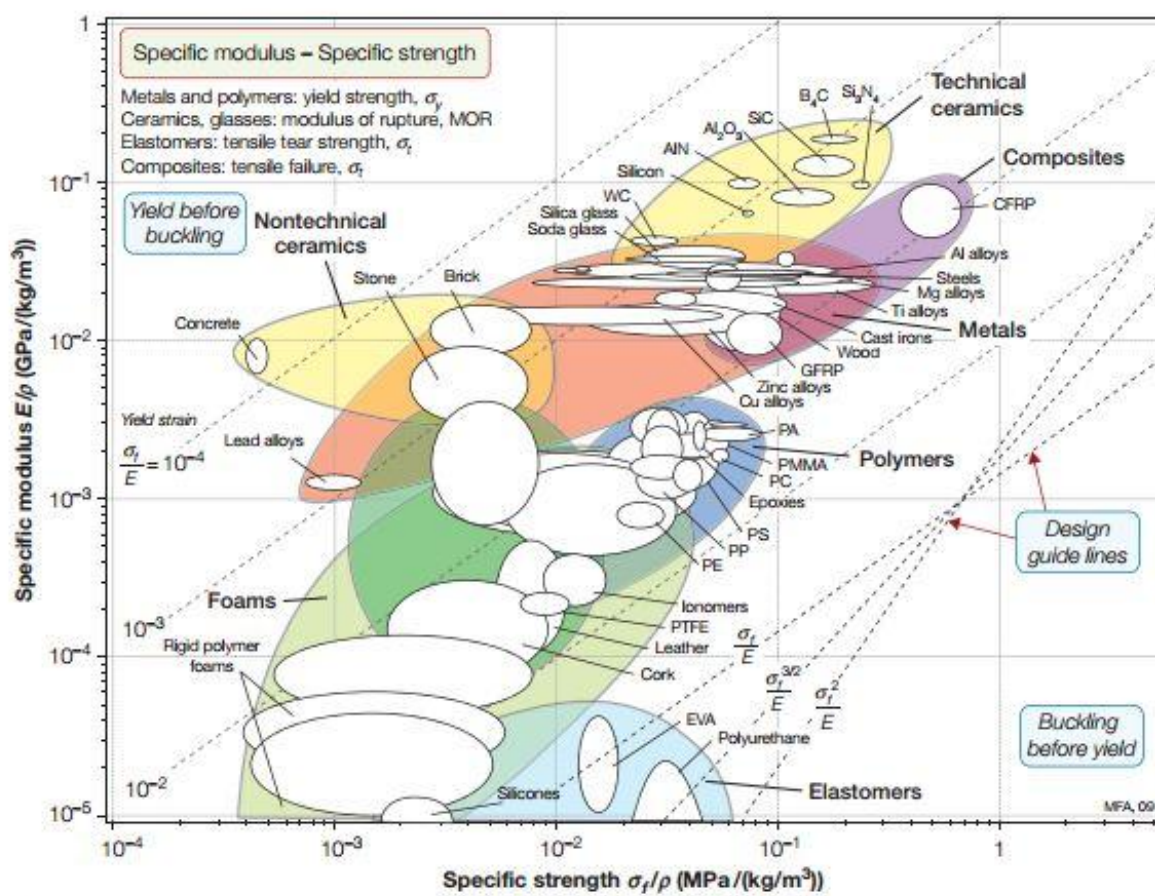


Figura 52- Eficiência Mecânica dos materiais compósitos (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007).

Resistência à fratura

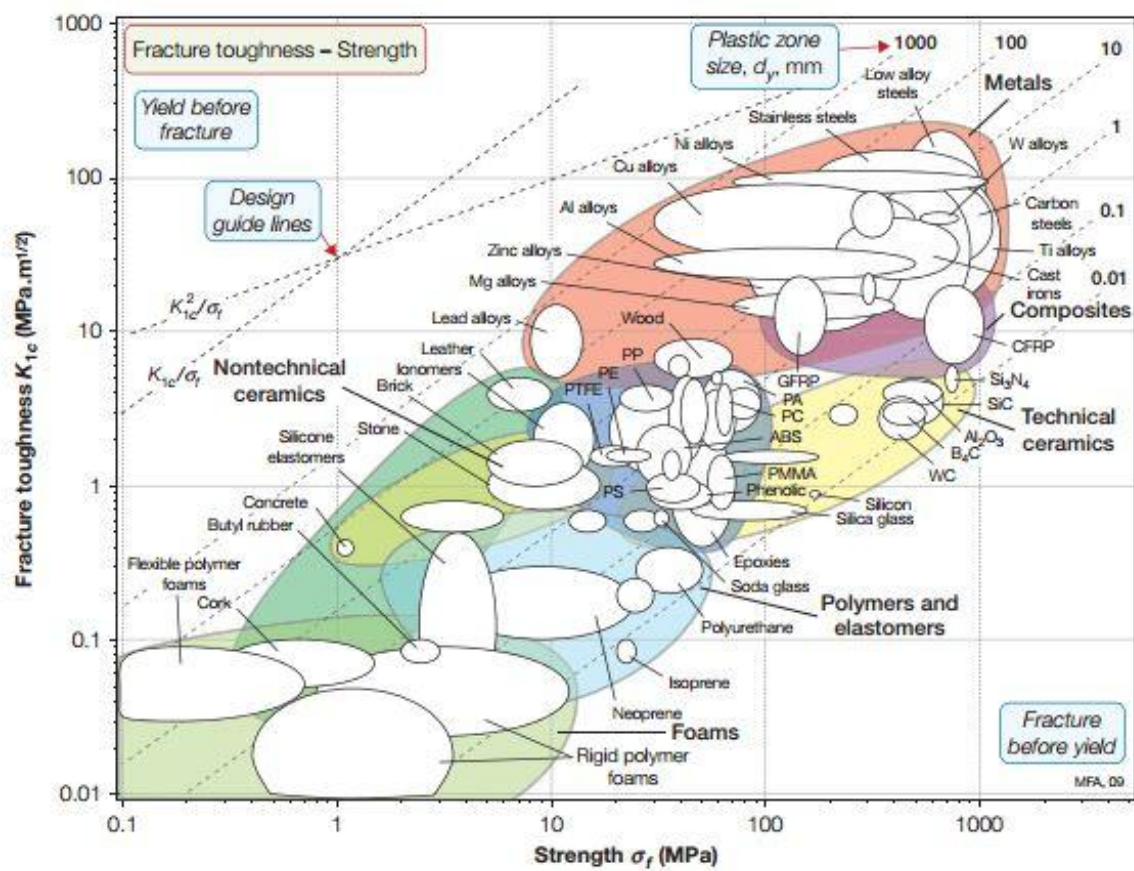


Figura 53- Resistência à fratura dos materiais compósitos (Mangino, Carruthers, e Pitarresi 2007).

ANEXO B: Resultados

Tabela 37- Resultados das primeiras simulações, espessuras [2,4,2].

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
0 90 0	2 4 2	342	C (T800H) epóxico
90 0 90	2 4 2	252	C (T800H) epóxico
0 90 0	2 4 2	351	C (IM7) epóxico (977-2)
90 0 90	2 4 2	252	C (IM7) epóxico (977-2)
0 90 0	2 4 2	336	C (T300) epóxico (934)
90 0 90	2 4 2	242	C (T300) epóxico (934)
0 90 0	2 4 2	332	C (AS4) epóxico (3501)
90 0 90	2 4 2	252	C (AS4) epóxico (3501)
0 90 0	2 4 2	336,9	C (AS4) PEEK (APC2)
90 0 90	2 4 2	247	C (AS4) PEEK (APC2)

Orientação	Espessura (mm)	Tensão máxima (MPa)	Material
0	2	250,6	Fibra de vidro epóxico
90	4		
0	2		
90	2	199,8	Fibra de vidro epóxico
0	4		
90	2		
0	2	339	Fibra de Kevlar® epóxico
90	4		
0	2		
90	2	236,8	Fibra de Kevlar® epóxico
0	4		
90	2		
0	2	346	Fibra de carbono epóxico
90	4		
0	2		
90	2	248	Fibra de carbono epóxico
0	4		
90	2		

Tabela 38- Resultados das primeiras simulações, espessuras [4,4].

Orientação	Espessura (mm)	Tensão máxima (MPa)	Material
0	4	222	C (T800H) epóxico
90	4		
0	4	229	C (IM7) epóxico (977-2)
90	4		
0	4	214	C (T300) epóxico (934)
90	4		
90	4	196	C (T300) epóxico (934)
0	4		
0	4	208,5	C (AS4) epóxico (3501)
90	4		
90	4	202	C (AS4) epóxico (3501)
0	4		
90	4	199	C (AS4) PEEK (APC2)
0	4		
0	4	215	C (AS4) PEEK (APC2)
90	4		
0	4	184	Fibra de vidro epóxico
90	4		
90	4	175	Fibra de vidro epóxico
0	4		

Orientação	Espessura (mm)	Tensão máxima (MPa)	Material
0	4	221	Fibra de KEVLAR® epóxico
90	4		
90	4	192	Fibra de KEVLAR® epóxico
0	4		
0	4	225,8	Fibra de carbono epóxico
90	4		
90	4	199,8	Fibra de carbono epóxico
0	4		

Tabela 39- Resultados das primeiras simulações, espessuras [2,2,2].

Orientação	Espessura (mm)	Tensão máxima (MPa)	Material
0	2	352	C (IM7) epóxico (977-2)
90	2		
0	2		
90	2	329	C (IM7) epóxico (977-2)
0	2		
90	2		
0	2	343	C (T300) epóxico (934)
90	2		
0	2		
90	2	316	C (T300) epóxico (934)
0	2		
90	2		
0	2	345	C (AS4) epóxico (3501)
90	2		
0	2		
90	2	319,7	C (AS4) epóxico (3501)
0	2		
90	2		
0	2	345	C (AS4) PEEK (APC2)
90	2		
0	2		
90	2	319	C (AS4) PEEK (APC2)
0	2		
90	2		
90	2	288	Fibra de Vidro epóxico
0	2		
90	2		
0	2	288	Fibra de Vidro epóxico
90	2		
0	2		
90	2	341	Fibra de KEVLAR® epóxico
0	2		
90	2		

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
0	2	314	Fibra de KEVLAR® epóxico
90	2		
0	2		
90	2	349	Fibra de carbono epóxico
0	2		
90	2		
0	2	325	Fibra de carbono epóxico
90	2		
0	2		

Tabela 40- Resultados das primeiras simulações, espessuras [3,3].

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
0	3	325	C(T800H) epóxico
90	3		
0	3	337	C(IM7) epóxico (977-2)
90	3		
0	3	316	C(T300) epóxico (934)
90	3		
90	3	283	C(AS4) epóxico (3501)
0	3		
0	3	305	C(AS4) epóxico (3501)
90	3		
0	3	316	C(AS4) PEEK (APC2)
90	3		
90	3	278	C(AS4) PEEK (APC2)
0	3		
0	3	262	Fibra de vidro epóxico
90	3		
90	3	242	Fibra de vidro epóxico
0	3		
0	3	321	Fibra de Kevlar® epóxico
90	3		
90	3	265	Fibra de kevlar® epóxico
0	3		
0	3	333	Fibra de carbono epóxico
90	3		
90	3	276,6	Fibra de carbono epóxico
0	3		

Tabela 41- Resultados das primeiras simulações, espessuras [5,5].

Orientação	Espessura (mm)	Tensão máxima (MPa)	Material
0 90	5 5	245	Fibra de vidro S + Strucell P80
0 90	5 5	169	C (T800H) epóxico
90 0	5 5	170	C (IM7) epóxico (977-2)
0 90	5 5	163	C (T300) epóxico (934)
90 0	5 5	119	C (T300) epóxico (934)
0 90	5 5	163	C (AS4) PEEK (APC2)
90 0	5 5	1126	C (AS4) PEEK (APC2)
0 90	5 5	137	Fibra de vidro epóxico
90 0	5 5	119	Fibra de vidro epóxico
0 90	5 5	170	Fibra de KEVLAR® epóxico
90 0	5 5	116	Fibra de KEVLAR® epóxico
0 90	5 5	175	Fibra de carbono epóxico
90 0	5 5	120	Fibra de carbono epóxico

ANEXO C: Deslocamentos e tensões

As tabelas apresentadas neste anexo são relativas aos deslocamentos e tensões máximas verificados nos diferentes modelos.

- **No primeiro modelo:**

Tabela 42- Deslocamentos máximos no primeiro modelo.

<i>Material</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Deslocamento Máximo (mm)</i>
Aço	2	-1,9
Alumínio	2	-5,8
Alumínio	4	-2,8
Vidro epóxico /Carbono	10	-0,8

- **No segundo modelo:**

As tabelas seguintes apresentam os resultados obtidos das simulações feitas no segundo modelo para os diferentes materiais, com as diferentes orientações de camada. Serão apresentados todos os resultados, por uma questão de facilidade de comparação, mesmo que por esse motivo haja resultados repetidos ao longo do documento.

Tabela 43- Tensão máxima C (T800H) epóxico [0,90], 2º modelo.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
0	5	169	C (T800H) epóxico
90	5		

Tabela 44- Tensões no ponto crítico de C (T800H) [0,90] epóxico, 2º modelo.

S_{11}	-168,5	$\sigma_{uc1} = 1550$
	85,2	$\sigma_{uf1} = 2840$
S_{22}	-23,6	$\sigma_{uc2} = 165$
	7,4	$\sigma_{uf2} = 52$
S_{12}	-13,7	$\tau_{12} = 58$
	18,9	

Tabela 45- Tensão máxima C (T300) epóxico [0,90], 2º modelo.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
0	5	163,9	C (T300) epóxico
90	5		

Tabela 46- Tensões no ponto crítico de C (T300) [0,90] Epóxico, 2º modelo.

S_{11}	-162,3 84,7	$\sigma_{uc1} = 1280$ $\sigma_{uf1} = 1314$
S_{22}	-26,8 7,6	$\sigma_{uc2} = 168$ $\sigma_{uf2} = 43$
S_{12}	-9,5 13,8	$\tau_{12} = 48$
Deslocamento	6,9 mm	

Tabela 47- Tensão máxima C (T300) epóxico [90,0], 2º modelo.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
90	5	119	C (T300) epóxico
0	5		

Tabela 48- Tensões no ponto crítico de C (T300) epóxico [90,0], 2º modelo.

S_{11}	-118,5 36,3	$\sigma_{uc1} = 1280$ $\sigma_{uf1} = 1314$
S_{22}	-17,9 2,4	$\sigma_{uc2} = 168$ $\sigma_{uf2} = 43$
S_{12}	-10,9 15,2	$\tau_{12} = 48$
Deslocamento	6,4	

Tabela 49- Tensão máxima C (AS4) PEEK [0,90], 2º modelo.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
0	5	163	C (AS4) PEEK (APC2)
90	5		

Tabela 50- Tensões no ponto crítico de C (AS4) PEEK [0,90], 2º modelo.

S_{11}	-161,7 83,3	$\sigma_{uc1} = 1100$ $\sigma_{uf1} = 2130$
S_{22}	-25,1 6,9	$\sigma_{uc2} = 200$ $\sigma_{uf2} = 80$
S_{12}	-10,2 15	$\tau_{12} = 160$
Deslocamento	7 mm	

Tabela 51- Tensão máxima C (AS4) PEEK [90,0], 2º modelo.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
90	5	122	C (AS4) PEEK (APC2)
0	5		

Tabela 52- Tensões no ponto crítico de C (AS4) PEEK (APC2) [90,0], 2º modelo.

S_{11}	-120,5 35,3	$\sigma_{uc1} = 1100$ $\sigma_{uf1} = 2130$
S_{22}	-16,7 21,4	$\sigma_{uc2} = 200$ $\sigma_{uf2} = 80$
S_{12}	-11,5 16,2	$\tau_{12} = 160$
Deslocamento		7

Tabela 53- Tensão máxima fibra de vidro epóxico [0,90], 2º modelo.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
0	5	137	Fibra de vidro epóxico
90	5		

Tabela 54- Tensões no ponto crítico de fibra de vidro epóxico [0,90], 2º modelo.

S_{11}	-133,1 31,7	$\sigma_{uc1} = 600$ $\sigma_{uf1} = 1250$
S_{22}	-74,3 19,6	$\sigma_{uc2} = 141$ $\sigma_{uf2} = 36$
S_{12}	-30,3 23,8	$\tau_{12} = 63$
Deslocamento	13,4 mm	

Tabela 55- Tensão máxima fibra de vidro epóxico [90,0], 2º modelo.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
90	5	119	Fibra de vidro epóxico
0	5		

Tabela 56- Tensões no ponto crítico de fibra de vidro epóxico [90,0], 2º modelo.

S_{11}	-135,1 37,9	$\sigma_{uc1} = 600$ $\sigma_{uf1} = 1250$
S_{22}	-52,7 12,5	$\sigma_{uc2} = 141$ $\sigma_{uf2} = 36$
S_{12}	-22,8 29,6	$\tau_{12} = 63$
Deslocamento	12,6	

Tabela 57- Tensão máxima fibra de KEVLAR® epóxico [0,90], 2º modelo.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
0	5	170	Fibra de KEVLAR® epóxico
90	5		

Tabela 58- Tensões no ponto crítico de fibra de KEVLAR® epóxico [0,90], 2º modelo.

S_{11}	-169,3	$\sigma_{uc1} = 280$
	87,5	$\sigma_{uf1} = 1410$
S_{22}	-26,6	$\sigma_{uc2} = 141$
	7,9	$\sigma_{uf2} = 28$
S_{12}	-8,5	$\tau_{12} = 45$
	11,6	
Deslocamento		11,8 mm

Tabela 59- Tensão máxima fibra de KEVLAR® epóxico [90,0], 2º modelo

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
90	5	115,9	Fibra de KEVLAR® epóxico
0	5		

Tabela 60- Tensões no ponto crítico de fibra de KEVLAR® epóxico [90,0], 2º modelo.

S_{11}	-114,91	$\sigma_{uc1} = 280$
	40,1	$\sigma_{uf1} = 1410$
S_{22}	-18,3	$\sigma_{uc2} = 141$
	2,7	$\sigma_{uf2} = 28$
S_{12}	-9,8	$\tau_{12} = 45$
	13,5	
Deslocamento		10,9

Tabela 61- Tensão máxima fibra de carbono epóxico [0,90], 2º modelo.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
0	5	175	Fibra de carbono epóxico
90	5		

Tabela 62- Tensões no ponto crítico de fibra de carbono epóxico [0,00], 2º modelo.

S_{11}	-174,3	$\sigma_{uc1} = 1130$
	86,5	$\sigma_{uf1} = 1270$
S_{22}	-20,7	$\sigma_{uc2} = 141$
	5,8	$\sigma_{uf2} = 42$
S_{12}	-9,7	$\tau_{12} = 63$
	13,4	
Deslocamento		7,5 mm

Tabela 63- Tensão máxima fibra de carbono epóxico [90,0], 2º modelo.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
90	5	120	Fibra de carbono epóxico
0	5		

Tabela 64- Tensões no ponto crítico de fibra de carbono epóxico [90,0], 2º modelo.

S_{11}	-174,3 86,5	$\sigma_{uc1} = 1130$ $\sigma_{uf1} = 1270$
S_{22}	-20,7 5,8	$\sigma_{uc2} = 141$ $\sigma_{uf2} = 42$
S_{12}	-9,6 13,4	$\tau_{12} = 63$
Deslocamento	6,9 mm\	

- Para o modelo híbrido:

Tabela 65- Resultados obtidos para C (T800H) epóxico [0,90], modelo híbrido.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
0	5	325,7	C (T800H) epóxico Alumínio
90	5		
-	3		

Tabela 66- Tensões no ponto crítico de C (T800H) epóxico [0,90], modelo híbrido.

S_{11}	-255,9 115,7	$\sigma_{uc1} = 1550$ $\sigma_{uf1} = 2840$
S_{22}	-368,1 32,6	$\sigma_{uc2} = 165$ $\sigma_{uf2} = 52$
S_{12}	-15,2 107,3	$\tau_{12} = 58$
Deslocamento	14 mm	

Tabela 67- Resultados obtidos para C (T800H) epóxico [0,90], modelo híbrido.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
0	5	236,4	C (T800H) epóxico Alumínio
90	5		
-	4		

Tabela 68- Tensões no ponto crítico de C (T800H) epóxico [0,90], modelo híbrido.

S_{11}	-190 86,9	$\sigma_{uc1} = 1550$ $\sigma_{uf1} = 2840$
S_{22}	-210 23,5	$\sigma_{uc2} = 165$ $\sigma_{uf2} = 52$
S_{12}	-11,9 86,5	$\tau_{12} = 58$
Deslocamento	11,1 mm	

Tabela 69- Resultados obtidos para C (T800H) epóxico [90,0], modelo híbrido.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
90	5	227,8	C (T800H) epóxico Alumínio
0	5		
-	4		

Tabela 70- Tensões no ponto crítico de C (T800H) epóxico [90,0], modelo híbrido.

S_{11}	-318,4 80,6	$\sigma_{uc1} = 1550$ $\sigma_{uf1} = 2840$
S_{22}	-271,4 28,6	$\sigma_{uc2} = 165$ $\sigma_{uf2} = 52$
S_{12}	-11 87	$\tau_{12} = 58$
Deslocamento	11,1 mm	

Tabela 71- Resultados obtidos para C (T300) epóxico [90,0], modelo híbrido.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
90	5	228,9	C (T300) epóxico Alumínio
0	5		
-	4		

Tabela 72- Tensões no ponto crítico de C (T300) epóxico [90,0], modelo híbrido.

S_{11}	-316,1 81,5	$\sigma_{uc1} = 1280$ $\sigma_{uf1} = 1314$
S_{22}	-272,4 28,9	$\sigma_{uc2} = 168$ $\sigma_{uf2} = 43$
S_{12}	-11,1 87,2	$\tau_{12} = 48$
Deslocamento	11,4 mm	

Tabela 73- Resultados obtidos para fibra de KEVLAR® epóxico [90,0], modelo híbrido.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
90	5	230	Fibra de KEVLAR®
0	5		epóxico
-	4		Alumínio

Tabela 74- Tensões no ponto crítico de fibra de KEVLAR® epóxico [90,0], modelo híbrido.

S_{11}	-311,1 83,8	$\sigma_{uc1} = 280$ $\sigma_{uf1} = 1410$
S_{22}	-276,4 29,7	$\sigma_{uc2} = 141$ $\sigma_{uf2} = 28$
S_{12}	-11,5 87,9	$\tau_{12} = 45$
Deslocamento	13,3 mm	

Tabela 75- Resultados obtidos para fibra de vidro epóxico [90,0], modelo híbrido.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
90	5	233,9	Fibra de vidro epóxico
0	5		
-	4		Alumínio

Tabela 76- Tensões no ponto crítico de fibra de vidro epóxico [90,0], modelo híbrido.

S_{11}	-308,4 84,4	$\sigma_{uc1} = 600$ $\sigma_{uf1} = 1250$
S_{22}	-279,4 28,7	$\sigma_{uc2} = 141$ $\sigma_{uf2} = 36$
S_{12}	-11,6 88,7	$\tau_{12} = 63$
Deslocamento	12,8 mm	

Tabela 77- Resultados obtidos para fibra de carbono epóxico [90,0], modelo híbrido.

<i>Orientação</i>	<i>Espessura (mm)</i>	<i>Tensão máxima (MPa)</i>	<i>Material</i>
90	5	229,4	Fibra de carbono epóxico
0	5		
-	4		Alumínio

Tabela 78- Tensões no ponto crítico de fibra de carbono epóxico [90,0], modelo híbrido.

S_{11}	-315,7 81,8	$\sigma_{uc1} = 1130$ $\sigma_{uf1} = 1270$
S_{22}	-273,1 29,2	$\sigma_{uc2} = 141$ $\sigma_{uf2} = 42$
S_{12}	-11,2 87,3	$\tau_{12} = 63$
Deslocamento	11,8 mm	

ANEXO D: Tutorial

Este tutorial foi criado de maneira a responder a vários pedidos de informação do funcionamento do *abaqus*, e de como se fazem simulações no mesmo. Para começar, existem duas opções, ou desenhar no próprio programa, ou importar já o modelo. Neste caso foi importado o modelo, por isso este tutorial começará por aí. Usando o comando *File > import* conseguirá importar o ficheiro que pretender.

Para começar a trabalhar no modelo, é necessário definir o material que se quer utilizar.



Figura 54- Indicação do módulo
"Property"

No caso de querer trabalhar com materiais compósitos, estes normalmente são definidos a partir das constantes de engenharia, e para isso escolhe em vez de *isotropic*, *lamina* ou *engineering constants*.

Este é o primeiro módulo a que se deve aceder. Aqui será definido o material.

Neste botão, para introduzir apenas o módulo de *young* e coeficiente de *Poisson*, é necessário escolher *Mechanical > Elasticity > Elastic* e aparecerá o seguinte quadro.

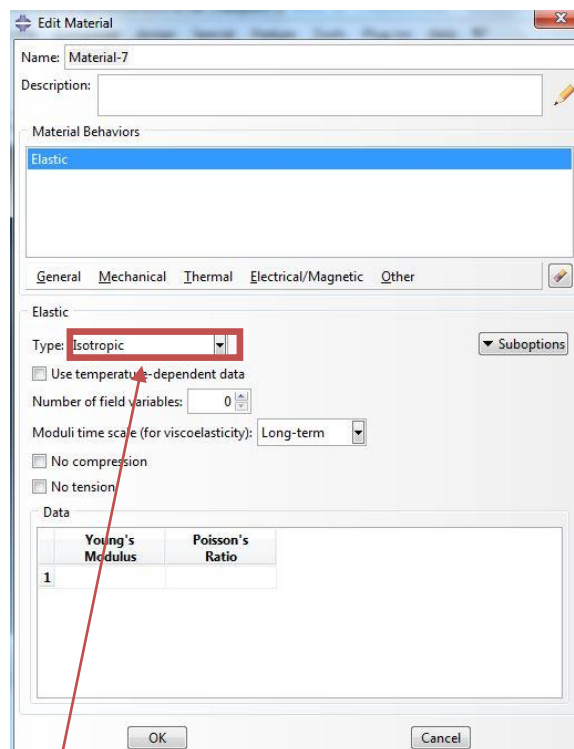


Figura 55- Como introduzir as propriedades dos materiais.

Ainda no mesmo módulo é necessário definir o material para uma determinada secção.

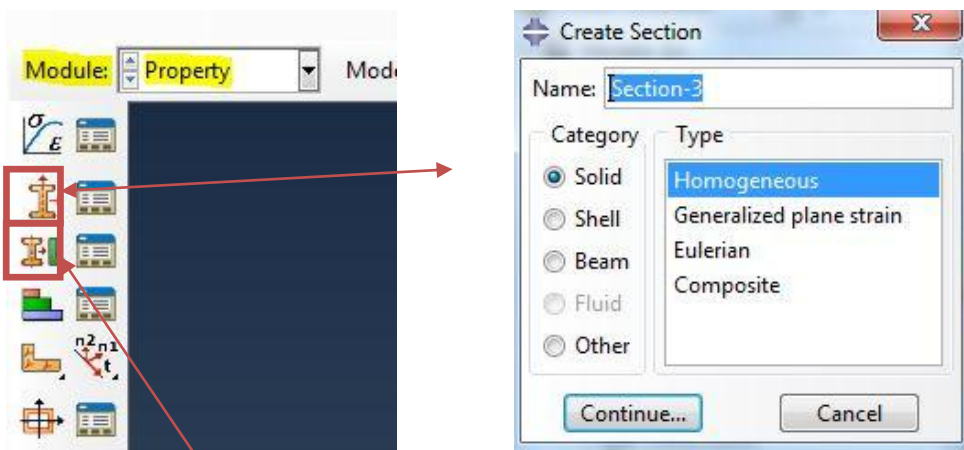


Figura 56- Tipo de secção que se pretende criar.

A figura 56 representa o menu, onde se deve escolher o tipo de secção que se pretende criar. Seguido disto, é seleccionar a secção que lhe é respetivo no modelo.

Definido o material é altura de passar para o módulo *Assembly*.

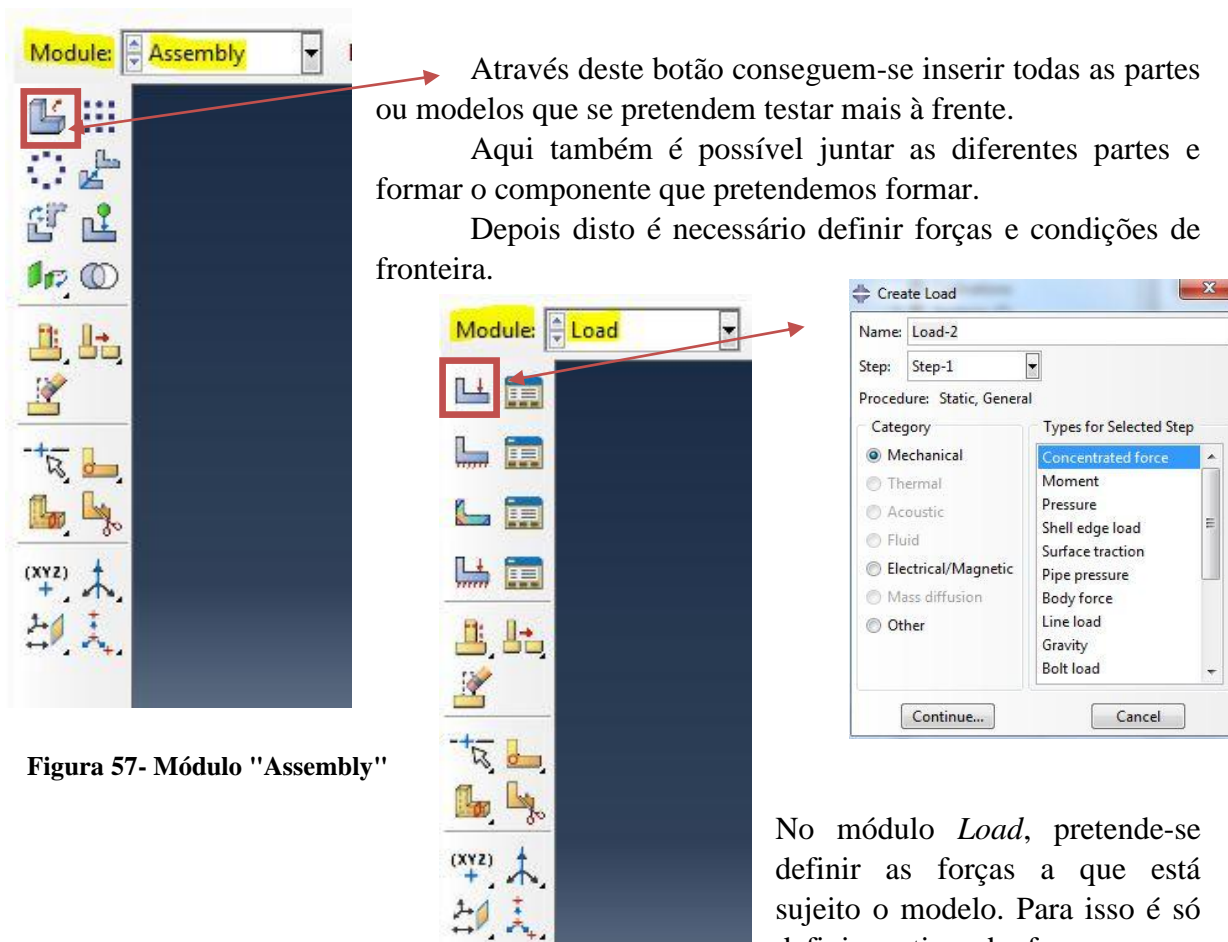


Figura 57- Módulo "Assembly"

No módulo *Load*, pretende-se definir as forças a que está sujeito o modelo. Para isso é só definir o tipo de força que se

pretende aplicar e dando continuidade é necessário definir os pontos ou planos onde é necessário aplicar essas forças e feito isso aparece outro quadro para que se defina, o eixo e a intensidade da força a aplicar.

Chegou a hora de definir as condições de fronteira.

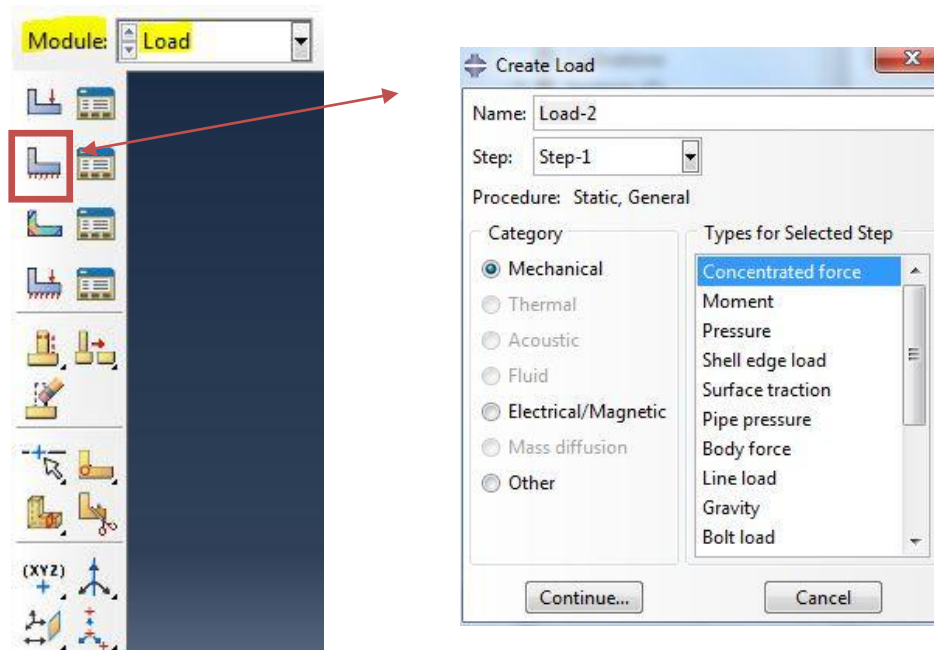


Figura 58- Definir forças e condições de fronteira

Definido o tipo de condição fronteira a aplicar, é necessário definir os pontos onde estas se localizarão.

No trabalho desenvolvido a malha foi criada por outro *software* por se tratar de uma estrutura muito complexa, e por isso, essa parte não fará parte deste tutorial. De qualquer forma para a sua definição é só recorrer ao módulo *Mesh*. Ainda assim, se por acaso se pretenderem fazer simulações de impacto ou com alguma interação entre os componentes é necessário definir tal coisa no módulo *Interaction*. Quase para finalizar e depois de tudo atrás estar definido é necessário criar a simulação que se pretende fazer.

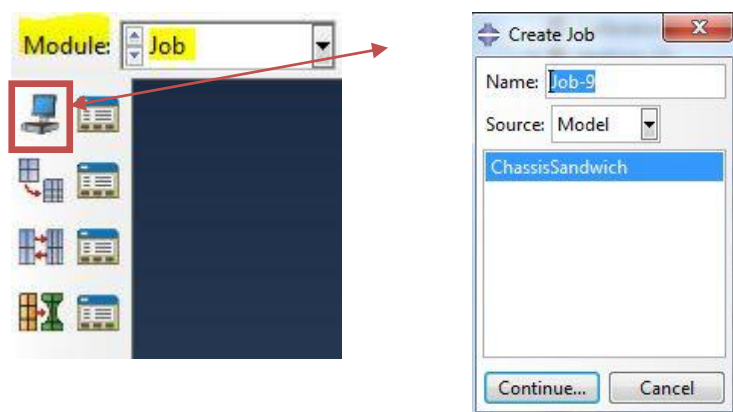
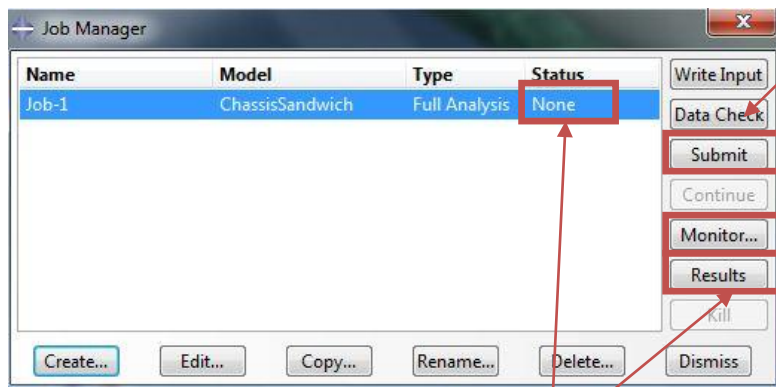


Figura 59- Definir a simulação

Para que a simulação fique definida é só dar continuar nos menus.



Para dar início à simulação.

Para fazer a monitorização da simulação.

Quando o *status* for *Completed*, a simulação acabou e é possível ver os seus resultados para isso

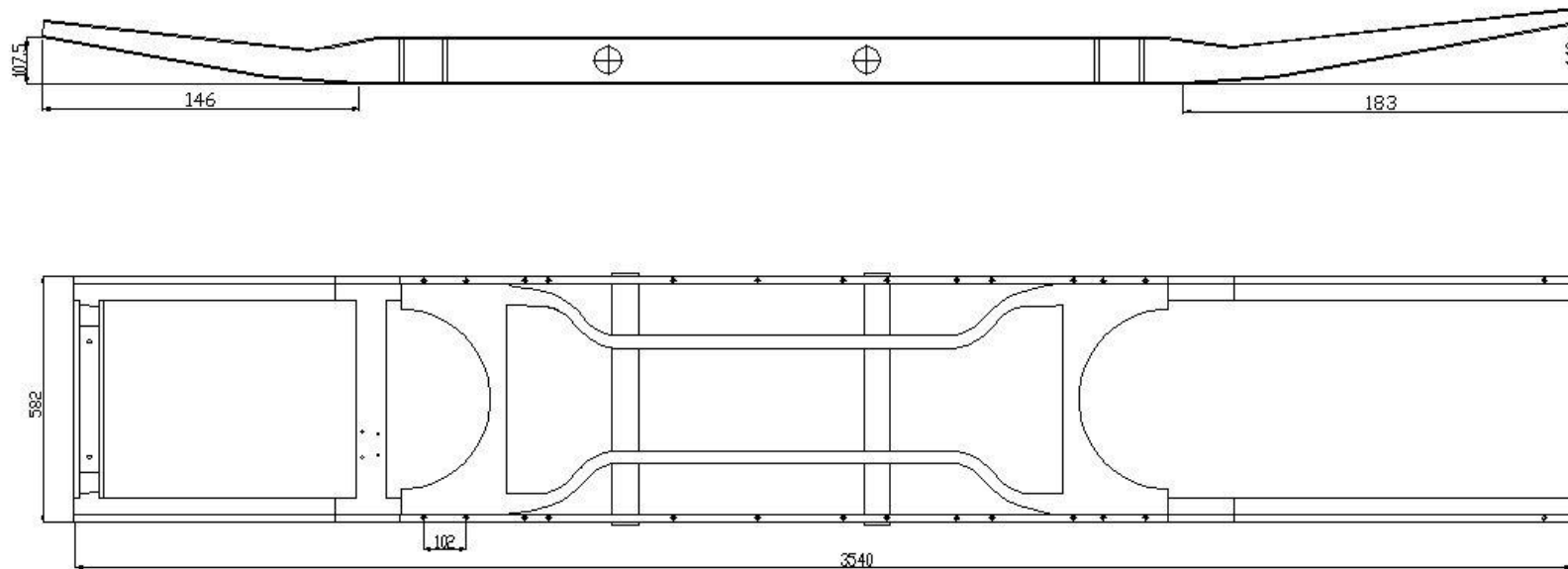


Neste módulo poderá ver os resultados da simulação, em termos de deformações e deslocamentos por exemplo. Se quiser perceber o que acontece em todos os nós e elementos do modelo, é necessário pedir *reports*, que transmitiram toda a informação que lhes pedir. Para isso, basta neste módulo aceder ao menu *Report > Field Output* e definir a informação que quer retirar da simulação.

Figura 60- Visualizar resultados

ANEXO E: Desenhos

- Do chassi original



- Do segundo modelo

